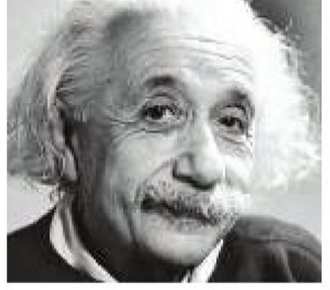
NUMÉRO SPÉCIAL

SCIENCES ET AVENIR

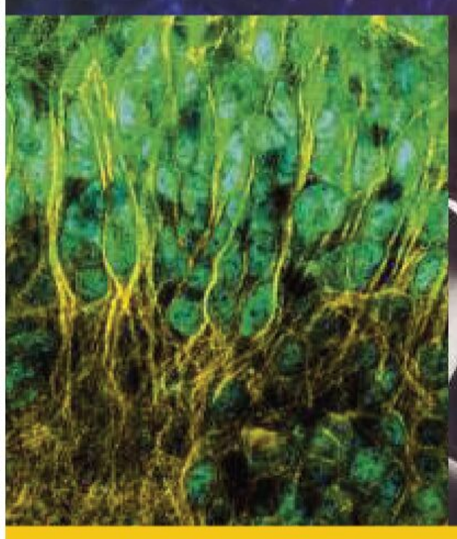
LES INDISPENSABLES

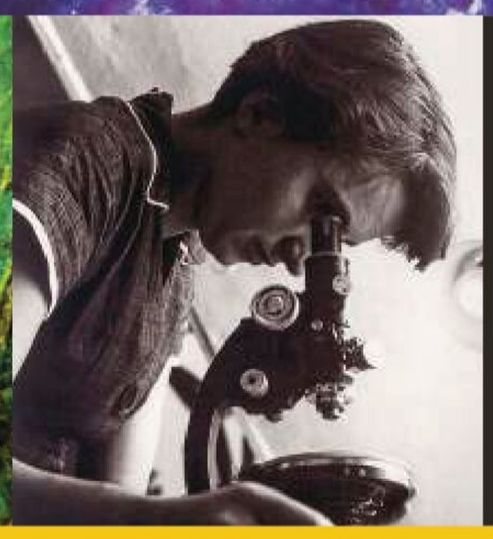


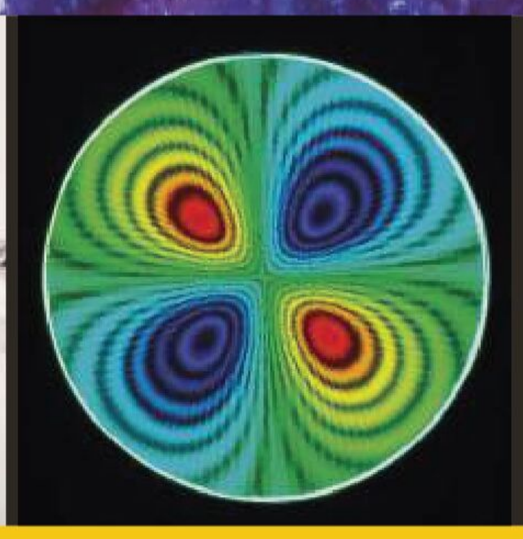
DERRIÈRE LA FIGURE DU GÉNIE, UN TRAVAIL TOUJOURS COLLECTIF

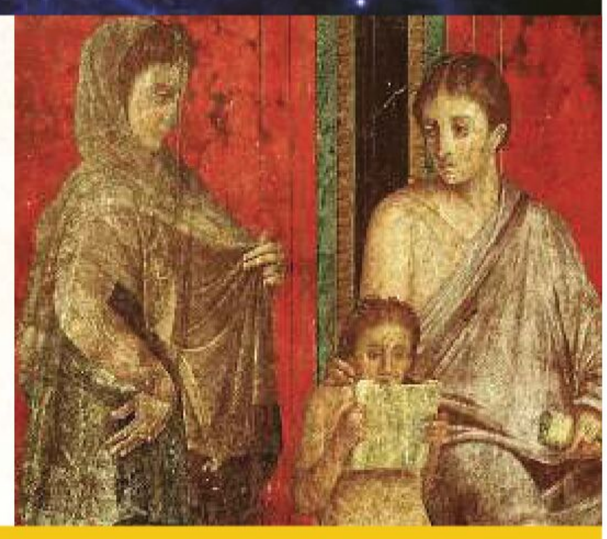
De l'Antiquité à nos jours

LES DÉCOUVERTES MAJEURES de la science









Trous noirs • Neurones • ADN • Atome • Rayons X
Pompéi • Néandertal • Pénicilline • Nombres complexes...

NUMÉRO SPÉCIAL 206 JUILLET/SEPTEMBRE 2021 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD

PHOTO12/ALAMY/DPA PICTURE ALLIANCE, HUBBLESITE, SPL/SUCRÉ SALÉ, WORLD HISTORY ARCHIVE/ANN RONAN PICTURE LIBRARY/ COLL. CHRISTOPHEL, SPL/SUCRÉ SALÉ, COLL. CHRISTOPHEL, AURIMAGES

L 13667 - 206 - F: 5,90 € - RD

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

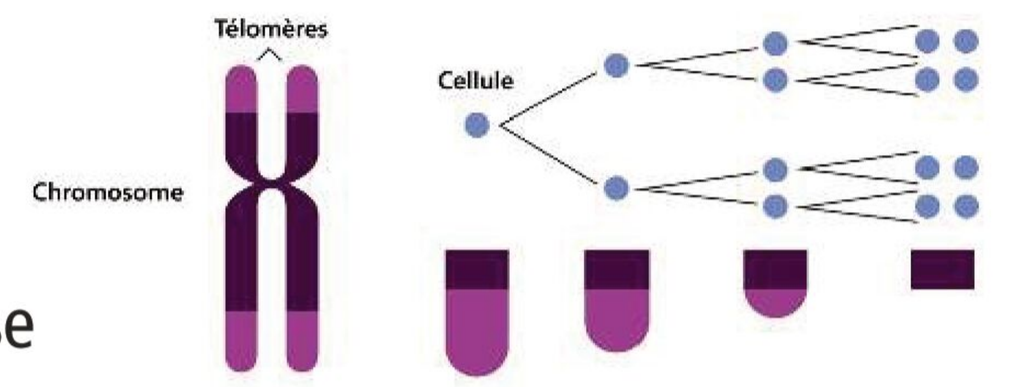
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

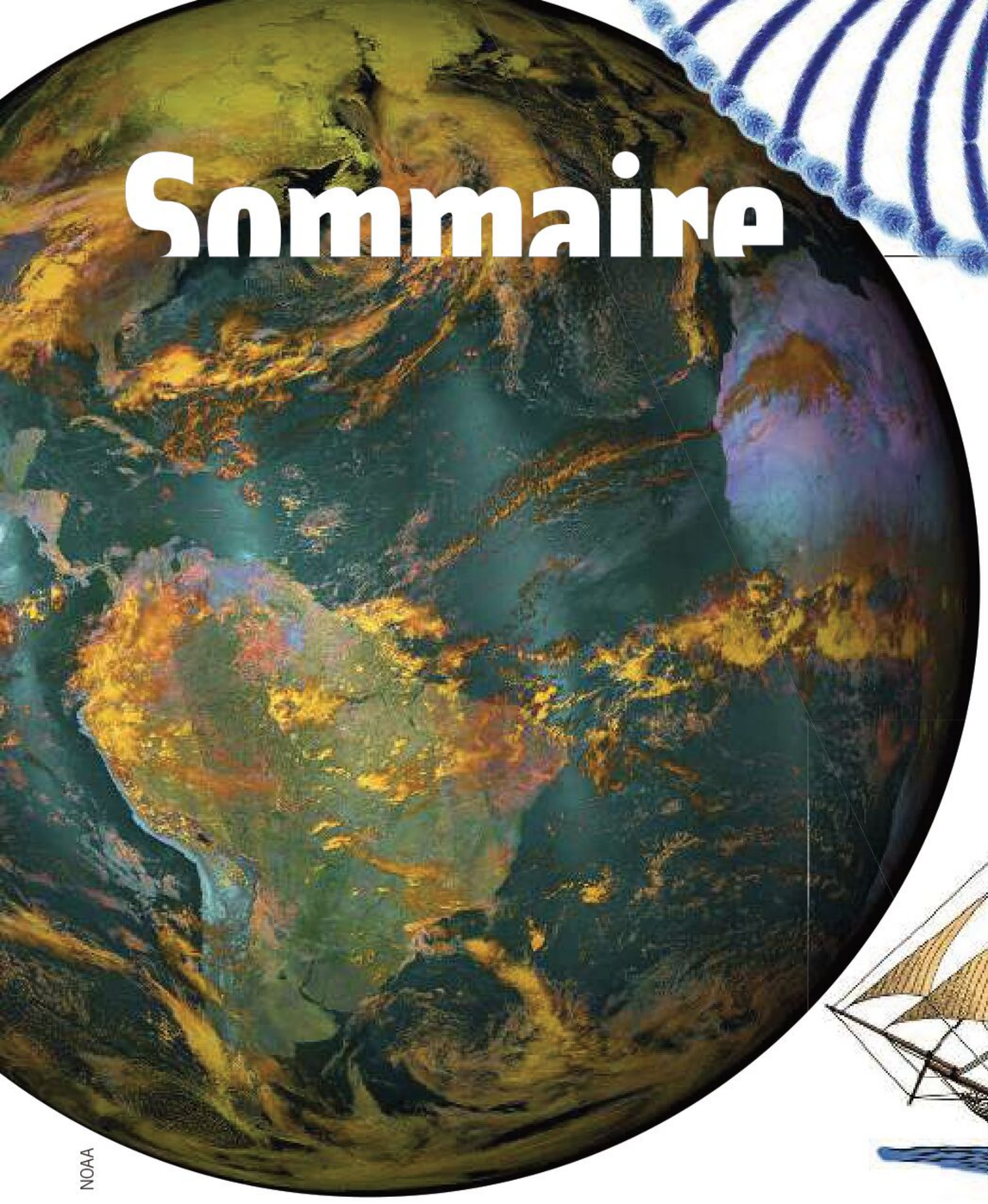
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Disponible en pharmacie et espace diététique

Telomerys
60 gélules
végétales
ACL 6024256
Des questions ?
Les experts
du Laboratoire
PhytoResearch sont
à votre écoute au
01 84 21 37 64 (tarif local) et
sur www.telomerys.com.

Sommaire



NOAA

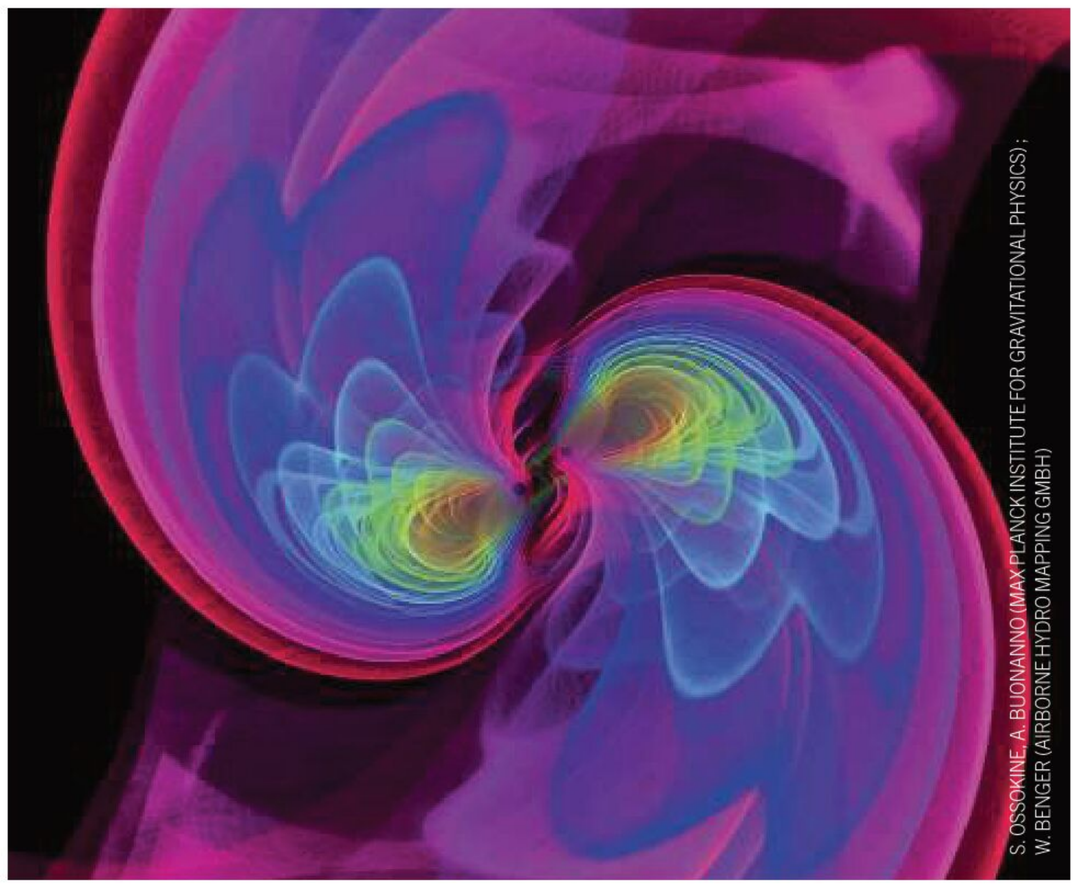
Planète sous surveillance renforcée P. 76

ALAMY/PHOTO12

Le voyage initiatique du jeune Darwin P. 68

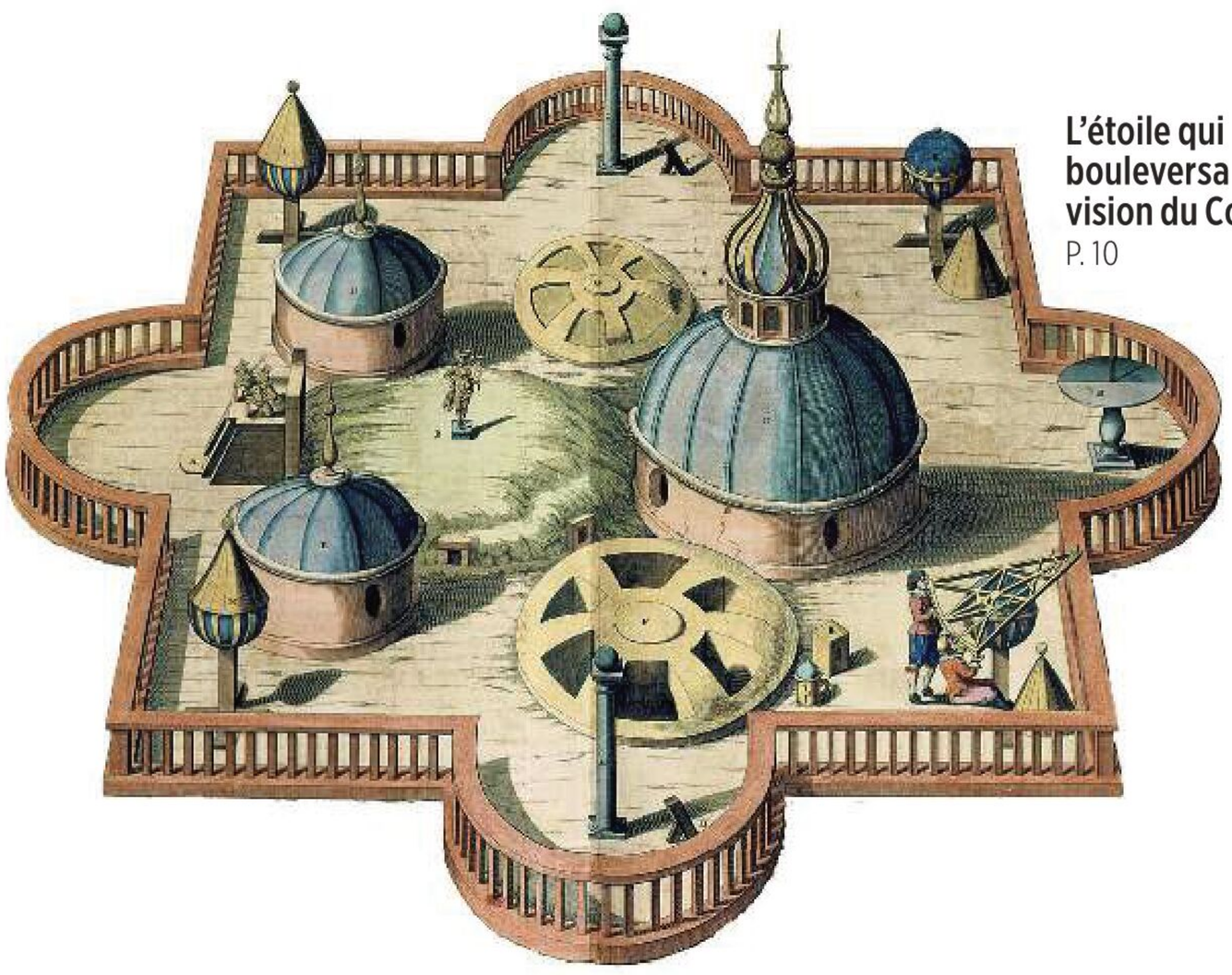
JOHN READER/SPL/SUCRE SALÉ

Néandertal, une nouvelle humanité P. 50



S. OSSOKINE, A. BUONANNO (MAX PLANCK INSTITUTE FOR GRAVITATIONAL PHYSICS) ; W. BENGER (AIRBORNE HYDRO MAPPING GMBH)

Einstein les a prédits, Ligo les a surpris P. 26



COLLECTION DAGLI ORTI / AURIMAGES

L'étoile qui bouleversa notre vision du Cosmos P. 10

GETTY IMAGES

Des petits pois à l'ADN, la saga du gène P. 38

5 **Édito**

6 **RENCONTRE**
Bernadette Bensaude-Vincent
« Dans la plupart des cas, on trouve autre chose que ce que l'on cherche »

10 **OBSERVATIONS**
L'étoile qui bouleversa notre vision du Cosmos

16 **HASARD**
Le prince, le paysan et la cité ensevelie

21 Et Isaïe revit enfin le jour…

22 **MATHÉMATIQUES**
La troublante réalité des mathématiques

24 **INTERVIEW Olga Paris-Romaskevich**
« En maths, nous pouvons découper une orange en deux oranges de même taille »

26 **CONFIRMATION D'UNE THÉORIE**
Trous noirs, ondes gravitationnelles : Einstein les a prédits, Ligo les a surpris

32 **LA PREUVE PAR L'IMAGE**
On a disséqué le siège de la pensée !

38 **EXPÉRIENCES**
Des petits pois à l'ADN, la saga du gène

44 **INTUITION**
L'atome, d'une théorie antique à la physique quantique

49 La lady, la variole… et le premier vaccin

50 **CHANGEMENT DE REGARD**
Néandertal, une nouvelle humanité

55 **CAHIER**
Découvrir, un art collectif

56 Fructueuses disputes

58 Invisibilisées !

60 L'esprit d'équipe

61 **INTERVIEW Sylvie Catellin**
« On ne peut planifier la recherche, pas plus que l'art ou la littérature »

62 **SÉRENDIPITÉ**
Rayons X : le hasard fait bien voir les choses

67 Pénicilline : les bons côtés de la saleté

68 **EXPÉDITIONS SCIENTIFIQUES**
Le voyage initiatique du jeune Darwin

73 Champollion, conquérant des hiéroglyphes

74 **INTERVIEW Alain Corbin**
« En 1883, on a pu suivre presque en direct l'éruption du Krakatoa »

76 **BIG DATA**
Planète sous surveillance renforcée

82 **PAGE WEB**

ÉVÉNEMENT 2021
EXPOSITION UNIVERSELLE DUBAI

Sciences et Avenir vous convie à une croisière unique, à l'occasion de l'exposition universelle de 2021 à Dubaï.

L'événement promet en effet d'être sans précédent, et pas seulement parce qu'il s'agit d'une première dans la région Moyen-Orient, Afrique, où 180 pays se retrouveront ainsi rassemblés. Son thème, qui appelle à **« Construire le futur »** est en parfaite résonance avec la ligne éditoriale de Sciences et Avenir. Il projette en effet dans l'avenir, avec toutes les interrogations majeures du présent : quelles sciences (climatologie, génétique, intelligence artificielle...) pour assurer une économie et une société durables ? Quelles nouvelles technologies pour la mobilité, entre avions, fusées mais aussi trottinettes ! Quelles opportunités nouvelles voyons-nous surgir ? Notre futur promet d'être, en effet, celui que nous voulons bâtir, fort de nos héritages, mais aussi en phase avec la modernité. Ici, l'invitation à « connecter les esprits ». Ces promesses d'avancées, nous les analyserons avec des scientifiques, des économistes, des spécialistes de géopolitique et de nouvelles technologies, de très haut niveau. Et ce, lors d'une croisière étonnante, faisant étape à Dubaï et au Pavillon Français de l'Exposition Universelle, mais aussi à Abu Dhabi et son musée du Louvre, ou encore en visitant la Rose des Sables, musée du Qatar à Doha... Des découvertes et des rencontres passionnantes en perspective.

Dominique LEGLU
Directrice éditoriale

AVEC VOUS À BORD !
Les conférenciers

Mikaa MERED
Professeur de géopolitique, observateur et analyste des Emirats Arabes, spécialiste des pôles et de l'hydrogène.

Marie-Christine de WARENGHIEN
Incontournable pour les architectours à Dubai & Abu Dhabi.

Jean-François CLERVOY
Astronaute français. Président de Novespace, filiale du Centre national d'Etudes spatiales (CNES).

SCIENCES ET AVENIR

Challenges

CROISIÈRE
LA MAGIE DES EMIRATS

10 JOURS / 7 NUITS
DU 03 AU 12 DEC. 2021
A BORD DU MSC VIRTUOSA

- 2 JOURS À L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE DUBAI
- ENTRÉES FAST TRACK
- VISITE DU PAVILLON FRANÇAIS
  Conférence et cocktail dînatoire
- EXCLUSIVITÉ : L'ARCHITECTOURS À DUBAI ET ABU DHABI.
- VISITE GUIDÉE MUSÉE DU LOUVRE ABU DHABI
- VISITE DE LA MOSQUÉE D'ABU DHABI
- VISITE DU PALAIS PRÉSIDENTIEL À ABU DHABI
- VISITE DU MUSÉE LA ROSE DES VENTS À DOHA
- VISITE DE LA BURJ EL KHALIFA
  LA TOUR LA PLUS HAUTE DU MONDE À DUBAI
- POUR LA PREMIÈRE FOIS, UNE ESCALE
  EN ARABIE SAOUDITE AUX PORTES
  DE LA PLUS GRANDE OASIS AU MONDE.
- BOISSONS À TABLE INCLUSES ET FORFAIT SÉJOUR À BORD

À PARTIR DE
2 790 €/PERS.
Au départ de Paris - En tout inclus

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
BLEU VOYAGES
voyager@bleu-voyages.fr
TÉL. 04 72 76 75 66
www.expo2021.fr

Selectour Bleu Voyages
MSC CROISIÈRES
Emirates

Neige et Soleil Voyages SAS au capital de 396 800 € • RC Bourgoin Jallieu B 398 629 766 • Code APE 7911 Z • Immatriculation Atout France 038110038 • Agence garantie par l'APST • 15 Avenue Carnot - 75017 Paris • Agence assurée pour sa responsabilité civile et professionnelle par le groupe MMA Entreprises n° de contrat 144569079.

Graph. www.pascalem.com - Crédits photos. Expo 2020 Dubai et Pixabay CC0

Édito

PHOTO12/SCIENCE PHOTO LIBRARY

SCIENCES ET AVENIR
LES INDISPENSABLES

NUMÉRO SPÉCIAL

41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale
Dominique LEGLU 56.02
Directrice de la rédaction
Carole CHATELAIN 56.57
Rédaction en chef Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Collaborateurs
Bernadette ARNAUD, Loïc CHAUVEAU
Ont collaboré à ce numéro
Jacques-Olivier BARUCH, Mehdi BENYEZZAR, Sylvie BRIET, Yann CHAVANCE, Sara De LACERDA, Denis DELBECQ, François FOLLIET, Nicolas GUTIERREZ C., Jean-François HAÏT, Roger MANSUY, William ROWE-PIRRA, Vahé TER MINASSIAN, Pierre VANDEGINSTE, Agnès VERNET
Pour joindre la rédaction
01 55 35 56 00 – redaction@sciencesetavenir.fr
Courrier des lecteurs
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01
Comptabilité compta@challenges.fr
Directeur général Philippe MENAT

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
4, rue de Mouchy – 60438 Noailles Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIES 93.70
Directeur délégué Philippe LEONARD 89. 18
Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL 97.75
Responsable Web Romain COUPRIE 89.25
Assistante commerciale Séverine LECLERC 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes
Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
01.55.35.56.62 assisté de Lina QUACH 56.63
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service abonnement 45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly, Cedex. Tél. : 03.28.38.47.69. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 e. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 e. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.

Copyright Sciences et Avenir.

Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par Presstalis.
Photogravure : Éric BACQUET
Fabrication : Christophe PERRUSSON

PEFC 10-31-1557
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,016 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Rotofrance Impression, certifié PEFC

ACPM OJD

Génie collectif

La scène se passe à Syracuse, au IIIe siècle avant notre ère. Un brillant esprit sort de son bain en hurlant *« eurêka ! »*. Archimède vient de découvrir les lois de l'hydrostatique. L'anecdote, rapportée par le Romain Vitruve quelques siècles plus tard, n'a jamais été avérée, mais sa puissance évocatrice l'a propulsée à travers les siècles. Associant à jamais la découverte à l'illumination. Eurêka est à Archimède ce que la pomme est à Newton : cet instant euphorique où soudain tout s'éclaire.

Or… il n'y a pas de « moment eurêka » ! Tout au moins, s'il existe, est-il une exception. Le couronnement d'un travail colossal nourri de doutes et de nuits blanches, d'expériences mille fois répétées, d'hypothèses partagées, discutées, réfutées… Ainsi va la science, qui souvent rime avec patience, loin du grand récit héroïque qu'elle aime à (se) raconter. *« C'est une lente construction, toujours collective*, nous rappelle la philosophe et historienne des sciences Bernadette Bensaude-Vincent en ouverture de ce numéro. *Et à laquelle chaque chercheur qui peine sur un problème minuscule apporte sa pierre »*, y compris celui dont l'objet de recherche peut prêter à sourire*.

Non, Einstein n'était pas un génie solitaire ! Pas plus que Kepler ou Marie Curie… Pas de relativité générale sans les mathématiciens Bernhard Riemann et Marcel Grossmann – la géométrie de l'un et les conseils de l'autre. Si génial soit-il, l'auteur d'une découverte appartient à son époque, à son labo. Et s'appuie sur le travail de ses prédécesseurs. Newton l'a écrit, et le philosophe Bernard de Chartres bien avant lui : nous sommes des nains juchés sur les épaules de géants…

De l'atome au neurone, des trous noirs à Néandertal, les découvertes – majeures – réunies dans ces colonnes nous permettent, à y regarder de plus près, de comprendre comment la science se fait. *« La méthode scientifique est un idéal qui n'existe nulle part,* prévient l'historienne. *En réalité, il y en a plusieurs… »* Voilà pourquoi nous avons choisi de « classer » ces objets de science selon le paramètre décisif qui a permis leur découverte : ici, l'amélioration spectaculaire des techniques et des instruments, là, l'intuition, le changement de regard ou l'accumulation de données… Sans oublier le hasard, voire la sérendipité : c'est Röntgen découvrant incidemment les rayons X ; Fleming, les propriétés bactéricides d'une moisissure dont il tirera la pénicilline. Ils n'ont pas été frappés par un éclair de génie. Ils ont fait preuve de sagacité face à un phénomène imprévu. Illustrant le constat célèbre de Pasteur : « *La chance ne favorise que les esprits préparés* ».

Changeons de focale, comme nous y invite Bernadette Bensaude-Vincent, et observons… Ces découvertes qui ont ouvert la voie à une nouvelle compréhension du réel n'apparaissent-elles pas, finalement, comme *« quelques îlots de savoir dans un océan d'inconnu »* ? La connaissance est sans limites… Alors, tandis que nous entrons dans le temps d'un monde qui, lui, semble par bien des aspects fini, espérons : que les conditions soient toujours réunies pour qu'adviennent les Archimède de demain. Et que l'aventure continue !

VINCENT REA

* Ainsi de ces travaux couronnés chaque année à Harvard par les Ig Nobels – un pastiche du prestigieux prix – et dont nous avons parsemé ce numéro : leur intérêt est… parfois peu immédiat.

Rencontre

BERNADETTE BENSAUDE-VINCENT
Philosophe et historienne des sciences et technosciences

« Dans la plupart des cas, on trouve autre chose que ce que l'on cherche »

Découvrir, ce n'est que rarement dévoiler les secrets de la nature en un grand geste héroïque et solitaire, rappelle l'historienne. Mais plutôt inventer des outils théoriques, savoir se tromper, saisir l'inattendu…

Qu'est-ce qu'une découverte ?
Découvrir, au sens littéral, c'est dévoiler quelque chose de couvert ou de caché. À Paris, une statue de Louis-Ernest Barrias trône dans le grand escalier du musée des Arts et Métiers, une femme qui dégage sa poitrine. Son titre ? *La Nature se dévoilant devant la Science.* C'est la même idée qu'exprime Einstein à propos de l'hypothèse du physicien Louis de Broglie, pour qui les électrons sont des particules avec une onde associée : *« Il a levé un coin du grand voile »*. Voilà la conception dominante de la science, en Occident, depuis le XVIe siècle : le dévoilement de la nature – une conception largement sexiste… Sexiste, et même sadique, dans le cas du philosophe Francis Bacon, réputé être, au XVIIe siècle, un fondateur de la méthode expérimentale. Celui-ci entendait soumettre la nature à la question, autrement dit à la torture, pour lui faire cracher ses secrets. Quand on accélère des particules pour dégager des bosons de Higgs, comme on le fait aujourd'hui au Cern en Suisse, avec des instruments très lourds et très coûteux, c'est un peu violent…

Vous ne semblez pas adhérer à cette conception…
Selon moi, la science est moins un dévoilement qu'une construction. C'est un concept occidental. Le mot grec qui la désigne, *epistémè*, s'oppose à la *doxa*, l'opinion. Il désigne un savoir qui sait valider sa vérité. Il y a eu de grandes découvertes en Inde, en Chine ou chez les Mayas… Mais sans la conjonction de facteurs qui a créé en Occident une conception de la nature comme complètement séparée des humains, avec l'homme qui en serait *« comme le maître et possesseur »*, selon la formule de Descartes.

> **« Le philosophe Francis Bacon entendait soumettre la nature à la question, lui faire cracher ses secrets »**

Comment découvre-t-on ?
Le schéma qu'on a tous appris dans les manuels de lycée – de sciences ou de philo, d'ailleurs – c'est la méthode scientifique. Hypothèse, théorie, expérience, confirmation. Un idéal-type qui n'existe nulle part, bien loin du quotidien des scientifiques ! On ne travaille pas, on ne raisonne pas de la même façon en mathématiques, en physique, ou lorsqu'on est un scientifique de terrain. Il y a en réalité plusieurs styles expérimentaux. L'un est proche d'hypothèse-théorie-confirmation. Un autre sera complètement exploratoire : on va « à la pêche », on tâtonne. Dans les technosciences actuelles, c'est encore autre chose. Ce sont les instruments, plus que les hypothèses, qui orientent la recherche. Un exemple : on a mis au point, à grands frais, des systèmes de séquençage à haut débit pour le génome humain. Il faut donc en faire quelque chose… Alors on séquence tout : les eaux des égouts afin d'identifier les bactéries qui s'y trouvent, notre microbiome intestinal… Et parfois cela conduit à des découvertes majeures.
Toutefois, on oublie souvent qu'une grande partie du travail scientifique quotidien consiste non à « lever un coin du grand voile », mais à inventer de nouveaux outils, théoriques ou matériels. Crispr-Cas9 est essentiellement un outil de recherche, mais il est utilisé aussi comme outil de manipulation du vivant à d'autres fins que la recherche.

Comment une découverte devient… une découverte ?
Si c'est une découverte empirique, expérimentale, il faut répliquer les expériences pour la stabiliser. La validation passe par là, puis par la

Bernadette Bensaude-Vincent

Professeure émérite de philosophie des sciences et techniques à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, elle a notamment travaillé sur l'histoire des sciences françaises, l'histoire de la chimie et la philosophie des technologies émergentes.

Parmi ses ouvrages :
Temps-paysage. Pour une écologie des crises, Le Pommier, 2021

L'Opinion publique et la science, La Découverte, 2000

Lavoisier. Mémoires d'une révolution, Flammarion, 1993

discussion entre les pairs, mais aussi par la communication, qui fait partie intégrante du travail de construction scientifique. Pourquoi ? Parce que les médiateurs scientifiques – parmi lesquels vous, les médias – reformulent la découverte et lui donnent une autre allure. C'est un travail très progressif de stabilisation des faits.

Une découverte est-elle forcément universelle ?
Elle est universelle au terme de ce long processus de construction. Au départ, elle est toujours locale, située dans un milieu historique, dans un lieu, dans un laboratoire précis. Même dans le cas de découvertes simultanées, comme la loi d'Avogadro-Ampère : ces deux physiciens sont parvenus au même résultat sans avoir utilisé le même langage ni la même procédure. J'insiste beaucoup sur cette dimension culturelle de la science.

Dans le langage courant, on utilise parfois indifféremment les termes de découverte, d'invention, de théorie…
Inventer, c'est faire advenir à l'existence quelque chose qui n'était pas là. Ceci dit, dans certains cas, l'inventeur, c'est aussi celui qui trouve… Si vous tombez sur un vestige préhistorique dans votre jardin par ●●●

●●● exemple, vous en êtes « l'inventeur ». Et Christophe Colomb ? A-t-il découvert ou inventé l'Amérique ? De mon point de vue, il l'a inventée. Elle était, certes, déjà là, avec diverses civilisations… Lui en a créé une autre, qu'on a appelée Nouveau Monde : une colonie, une terre qu'on a spoliée, exploitée…
Prenons aussi l'exemple de la théorie de l'évolution : c'est une hypothèse qui a été confirmée sur certains points, revue sur d'autres, etc. Elle a marqué, parce qu'elle a servi d'hypothèse de travail pour quantité de recherches empiriques et de nouvelles observations. Les mathématiques sont aussi une création de l'esprit, une certaine relation à la réalité – sauf à considérer, comme les platoniciens, que les entités mathématiques existent comme des Idées au ciel des idées et qu'elles ont une réalité objective.

L'histoire a tendance à mettre au premier plan la figure du génie solitaire, à ne retenir que quelques grands noms…
La science a choisi de privilégier le grand récit des découvertes héroïques, le système des prix Nobel et des récompenses. C'est important, parce que les scientifiques ont besoin de se situer dans une épopée, une histoire qui donne sens au travail qu'ils font. Mais l'idée d'une découverte par un génie solitaire biaise la réalité du travail scientifique, qui est toujours collectif. La science est pétrie de travail manuel ! Il y a une foule d'acteurs cachés par ce culte du héros. Des techniciens invisibles, au savoir-faire irremplaçable. Et tous les scientifiques et les doctorants qui peinent sur un problème minuscule apportent leur pierre à l'édifice. On dit souvent qu'il faut être jeune pour faire des découvertes… Ce n'est pas vrai. Dans son labo, le jeune chercheur assimile toute la culture qui y a été amassée.
Reste que les « grands noms », il faut le dire, ont participé à la construction du grand récit. Le tout premier, à ma connaissance, est Lavoisier. Un beau matin de novembre 1772, il écrit sur son cahier de laboratoire un plan d'expérience, en disant : *« et ceci doit entraîner une révolution dans la physique et la chimie »*. Il construisait son grand récit, et en avait conscience.

> **L'idée d'une découverte par un génie solitaire biaise la réalité du travail scientifique, qui est toujours collectif**

Il y a tout de même des découvertes plus importantes que d'autres…
L'idée de « découvertes majeures » renvoie à la construction d'un grand récit. Je préfère raisonner en termes de changement de paradigmes, ces moments où l'on recompose tout l'édifice à partir des mêmes matériaux. Par exemple, celui de la science mécanique classique, avec la fameuse sainte trinité : Kepler, Galilée, Newton. Mais n'oublions pas qu'il y a plusieurs regards sur la réalité, et qu'à la même époque, beaucoup de « philosophes de la nature », notamment chimistes ou naturalistes, travaillaient sur d'autres bases, envisageaient la nature à partir de principes qualitatifs… Simplement, ces derniers ont été mis de côté, car on a tendance à éliminer tout ce qui ne conduit pas à la connaissance d'aujourd'hui. C'est ce que j'appelle une « histoire entonnoir ». Nous, historiens des sciences, nous attachons à resituer les théories du passé dans un contexte, dans une culture, pour en comprendre le sens. Même s'il a été renversé par la révolution mécaniste, Aristote n'était pas pour autant un imbécile !
De même, les alchimistes n'étaient pas des mystiques. Lorsqu'on refait leurs expériences, on s'aperçoit que leurs conclusions étaient parfaitement logiques et fondées, compte tenu du médiocre niveau de pureté des substances dont ils disposaient. Ce qui a pu être considéré comme une erreur faisait sens à leur époque. Et leurs constructions théoriques ont contribué à ce qu'on appelle la révolution scientifique du XVII^e siècle.

Justement, comment la science a-t-elle pris son essor au XVII^e siècle ?
Le grand récit peuplé de génies solitaires occulte non seulement la construction d'une science s'appuyant sur les générations précédentes, mais aussi le rôle essentiel des institutions scientifiques, soutenues et financées par les pouvoirs politiques de l'époque. En France, c'est Colbert qui a créé les académies sous Louis XIV. Les savants s'y réunissent, discutent, réalisent leurs expériences « devant témoins » et, petit à petit, définissent les normes et les standards nécessaires à la validation des résultats. La recherche s'émancipe de la tutelle de l'Église qui pesait sur les universités. Déjà, auparavant, l'imprimerie avait joué un rôle déterminant, diffusant l'ensemble du savoir disponible.

L'Église ne semble pas avoir joué un rôle… moteur dans la course au progrès.
Effectivement. Mais il est tout de même fondamental de rappeler que la religion a été un tremplin pour la constitution de la science occidentale moderne, à partir du XVII^e siècle. Le monothéisme a libéré la nature des puissances locales, des esprits qui habitent chaque morceau de matière, des fétiches, etc. La nature est régie par un ordre global donné par le Créateur. Après, on peut mettre le Créateur à la porte – de toute façon il y est déjà ! Souvenez-vous de la réponse de Laplace à Napoléon, qui lui faisait remarquer que Dieu était absent des cinq volumes de sa *Mécanique céleste* : *« Je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse. »*

Quelle est la part du hasard dans la découverte ?
Des découvertes dues au hasard, il y en a beaucoup ! Je dirais même que dans la plupart des cas, on trouve non pas ce qu'on cherche… mais autre chose. Il faut avoir l'esprit ouvert au détail. Ne pas jeter à la poubelle une manip' qui a raté. Une démarche qui relève de la sérendipité, l'association du hasard et de la sagacité. L'exemple le plus connu, c'est Röntgen découvrant les rayons X. Il se dit : tiens, il y a quelque chose d'étrange sur ma plaque photographique, c'est intéressant… Et il s'attarde sur une piste qu'il n'avait pas prévu d'explorer. Pour qu'on prenne le temps de regarder une expérience ratée, il faut deux choses : ne pas être trop pressé de publier et disposer d'une certaine liberté de recherche… Ce que les chercheurs réclament aujourd'hui plus que jamais.

Les découvertes ne sont-elles valorisées qu'à partir du moment où elles ont une application pratique ?
On a remplacé le culte du progrès par celui du nouveau. Les découvertes ne sont considérées comme telles que lorsqu'elles ouvrent vers une innovation. C'est pour moi une préoccupation majeure : on investit beaucoup d'argent dans les biotechnologies, mais on laisse se perdre des pans entiers de la recherche biologique. Tout le savoir-faire qui s'acquiert dans les laboratoires, de personne à personne, ne se transmet pas. La science est

« Ne pas jeter à la poubelle une manip' qui a raté : une démarche qui relève de la sérendipité, l'association du hasard et de la sagacité

pourtant un patrimoine qu'il faut conserver, exactement comme on conserve des collections au muséum.

Peut-on prévoir les découvertes de demain ?
C'est une question très intéressante. Dans les années 1960, on a pensé qu'il suffisait d'investir massivement de l'argent pour avoir des résultats. En 1972, Nixon a lancé le War on Cancer avec la promesse d'éradiquer la maladie. Cinquante ans plus tard, voyez où nous en sommes…
Plus on avance, plus on mesure qu'on n'a que quelques îlots de savoir dans un océan d'inconnues. Certaines inconnues sont « connues », et l'on sait qu'on va finir par y arriver, par exemple le moteur à hydrogène. En revanche, il en existe forcément d'autres qu'on ne sait même pas identifier. À la fin du XIXe siècle, il y a eu une angoisse terrible dans le monde scientifique : il n'y avait plus rien à découvrir. On avait les lois de la thermodynamique, l'électromagnétisme, l'atomisme… Et voilà qu'on découvre que l'atome est *« un petit monde fourmillant à explorer »*, selon l'expression du physicien Jean Perrin. Puis la théorie de la relativité et la théorie quantique changent les fondements de la physique. Puis on découvre les supports matériels de l'hérédité... À chaque fois, c'est un nouveau monde. Dans les prochaines décennies, la microbiologie, qui avait été abandonnée au bénéfice de la génétique et du tout-génomique, va probablement repartir en flèche. J'espère qu'on n'a pas perdu les savoir-faire du domaine, qui remonte à Pasteur…

Avec la puissance des outils d'aujourd'hui, peut-on imaginer des découvertes toujours plus nombreuses ?
Il y a aujourd'hui plus de scientifiques en activité qu'il n'y en a eu depuis le début de l'humanité, ne l'oublions pas. Parce qu'il y a tout simplement plus d'humains… Par ailleurs, on investit sans doute beaucoup plus aujourd'hui dans la recherche qu'au XVIIe siècle. Et pourtant, on constate une baisse tendancielle du rendement de la recherche. Est-ce parce qu'il y a des coins du grand voile plus difficiles à lever que d'autres ? Face à la complexité du monde, nos outils sont très rudimentaires. Je pense qu'on est loin d'avoir épuisé les richesses du réel. L'humanité disparaîtra avant qu'elle ait tout compris.

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA
PHOTOS : BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Poussières d'étoile. Cette image, issue des observations combinées de plusieurs télescopes (Chandra, Spitzer et Calar Alto), montre les résidus de la supernova vue en 1572 par l'astronome danois Tycho Brahe.

CHANDRA X-RAY OBSERVATORY CENTER

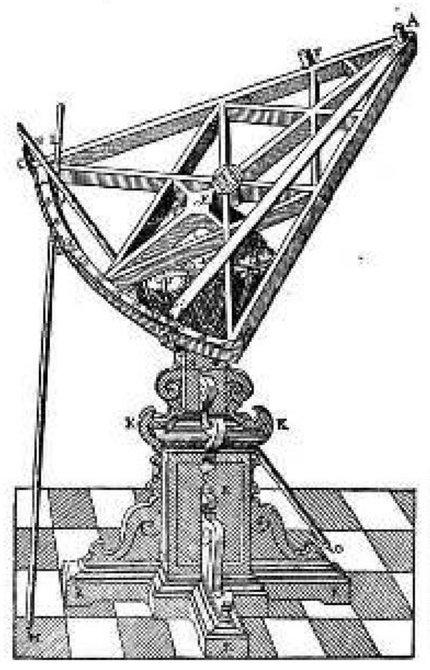
L'ÉTOILE QUI BOULEVERSA NOTRE VISION DU COSMOS

En 1572, un astre inconnu surgit dans le ciel alors réputé immuable, obligeant les astronomes à repenser la cosmogonie. Et les lançant dans une course à la précision des instruments de mesure.

Les livres d'histoire ont-ils toujours raison ? Pas si sûr… Ils enseignent volontiers que l'étoile nouvelle observée le 11 novembre 1572 par l'astronome Tycho Brahe (1546-1601) a sonné le glas des anciennes conceptions de l'Univers. Pourtant, *« sur le moment... elle n'a rien changé!* souligne Jean-Pierre Luminet, directeur de recherche au Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *On refait souvent l'histoire des sciences à rebours! »* Plusieurs décennies seront nécessaires pour que l'événement soit considéré à sa juste valeur : révolutionnaire !

Ce jour de novembre, donc, le Danois pointe son sextant vers le ciel comme il le fait aussi souvent que le temps le lui permet. Il guette les comètes, astres chevelus dont il se demande s'ils font partie du monde sublunaire, imparfait et changeant, ou de la sphère des fixes, au-delà de la Lune – monde immuable comme le lui ont appris Aristote et tous les penseurs depuis l'Antiquité. Mais dans la constellation de Cassiopée, une étoile nouvelle est apparue. Insensé ! Brahe n'est pas le seul à la voir. L'astronome Michael Maestlin, maître à penser de Johannes Kepler, la suivra lui aussi chaque nuit depuis Tübingen ●●●

À la minute près. Les instruments fabriqués pour Tycho Brahe lui ont permis de mesurer des distances avec une précision inédite. Ici, un sextant.



ABACAPRESS.COM

SHUTTERSTOCK

QUADRANT DE TYCHO BRAHE
Précision : 100 secondes d'arc

COLLECTION DAGLI ORTI / AURIMAGES

Centre de recherches. Conçu par et pour Brahe, Uraniborg regroupe un observatoire, une imprimerie et une fabrique d'instruments.

LUNETTE DE GALILÉE
Précision : 60 secondes d'arc

SPL/SUCRÉ SALÉ

Objectif Lune. En 1609, Galilée met au point une lunette qui lui permettra d'observer le relief lunaire et des étoiles invisibles à l'œil nu. Une première !

●●● (Allemagne). Elle s'affaiblira progressivement avant de disparaître en mars 1574.

Tycho Brahe ne sait que penser. Ce n'est pas un révolutionnaire. Il n'adhère pas aux thèses de Copernic qui, dès 1510, a placé au centre du système le Soleil autour duquel tournent la Terre et les autres planètes. Lui ménage la chèvre et le chou. Il imagine un système hybride où notre étoile, entourée des autres planètes, tourne comme la Lune autour de la Terre, astre central. Autour de ce système règne le monde parfait de la sphère des fixes. Son étoile nouvelle fait vaciller ce dogme, mais il l'écarte d'une pichenette.

Pendant seize mois, l'astronome danois va scruter sa *stella nova*. Il note qu'elle ne bouge pas et, constatant qu'il lui est impossible de mesurer sa parallaxe – changement de la position apparente d'un objet céleste en fonction du lieu où on l'observe –, en déduit qu'elle doit être très éloignée. Mesurée aujourd'hui suivant deux points opposés de l'orbite de notre planète autour du Soleil, la parallaxe était alors calculée à partir de deux points de la surface terrestre. À l'œil nu, comme dans le cas de Tycho Brahe, la précision d'une observation avoisine ainsi les 8 minutes d'arc, soit un quart du diamètre de la Lune. Brahe se rend compte que ce n'est pas suffisant pour déterminer l'éloignement de l'étoile nouvelle – on le sait aujourd'hui, elle est située vers 10 000 années-lumière, soit une parallaxe de moins d'une milliseconde d'arc (*lire l'interview p. 15*). Afin de rendre ses observations plus précises, l'astronome fera construire en 1576 un observatoire « moderne », loin de l'agitation du monde : Uraniborg (le « château d'Uranie », muse de l'astronomie), sur l'île de Hven que le roi Frédéric II de Danemark lui a offerte. Il y installera un quadrant géant en forme de quart de cercle, ramenant la précision à 100 secondes d'arc. Mais il sera alors trop tard pour mieux situer la « nouvelle étoile », déjà disparue…

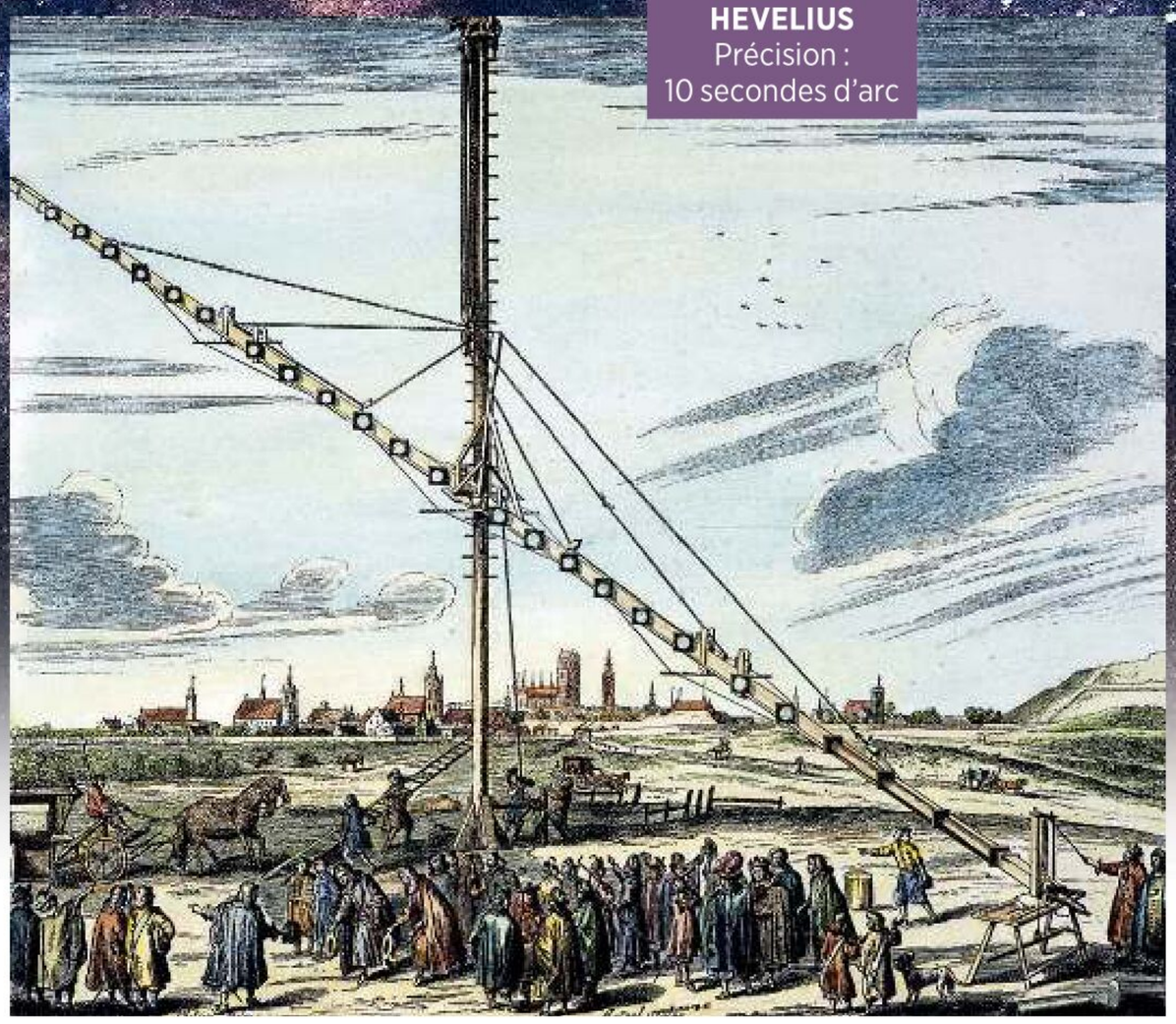
Tandis qu'il surveille la construction de son Uraniborg, il continue d'observer les comètes. L'une d'elles, apparue en 1577, le rend sceptique sur les thèses aristotéliciennes. Il constate en effet qu'elle a traversé la sphère de Vénus. *« Aristote et ses sectateurs, non seulement tenaient les comètes pour des objets sublunaires, mais pensaient que les planètes étaient fixées sur des orbes solides (et donc infranchissables) les entraînant dans leur rotation,*

ABACAPRESS.COM

Révolutionnaire… mais pas trop. Tycho Brahe (1546-1601) n'adhérera jamais à l'héliocentrisme.

La Voie lactée, avare en supernovae

Depuis 1604, aucune supernova n'a été observée dans notre galaxie, la Voie lactée. Celle de 1987, visible à l'œil nu, se situait dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie irrégulière satellite de la nôtre. Celles de Tycho (1572) et de Kepler (1604) sont les seules notées en Europe. Or, si l'on s'en tient à notre ère, c'est très peu ! Sans doute est-ce dû au peu d'intérêt des savants chrétiens pour l'astronomie au début du Moyen Âge. Les astronomes chinois, japonais ou coréens en ont quant à eux consigné plusieurs autres : en 185, en 386, en 393, en 1006, en 1054 et en 1181. Les Coréens en ont, en outre, noté deux en 1592, mais pour l'une d'entre elles, aucun résidu n'a jamais été trouvé. On devrait en observer beaucoup plus souvent – les prévisions évaluent le rythme à une supernova tous les deux ans dans la Galaxie –, mais elles se produisent généralement très loin ou sont tapies derrière les épais nuages de gaz et de poussières qui parsèment la Voie lactée. À noter que SN 1572 et la supernova de 1006 sont les seules de type Ia *(lire l'entretien p. 15)* observées dans la Galaxie. Les autres sont des supernovae de type II, des explosions d'étoiles massives en fin de vie, dont les réactions nucléaires se sont emballées en leur cœur qui s'est effondré sur lui-même.



GRANGER NYC/RUE DES ARCHIVES/BR DGEMANN

LUNETTE DE HEVELIUS
Précision : 10 secondes d'arc

Course au gigantisme. À la fin du XVII^e siècle, pour allonger la focale, on construit des lunettes immenses. Celle de Hevelius mesure 46 mètres !

ESA

GAIA
Précision : 0,00003 seconde d'arc

GETTYIMAGES

MONT PALOMAR
Précision : 0,1 seconde d'arc

Sur Terre et dans l'espace. Au XX^e siècle, les observatoires au sol sont supplantés, en précision, par les télescopes spatiaux.

écrit Gérard Simon, professeur émérite à l'université Lille III, lors des commémorations des quatre cents ans de la mort de Tycho Brahe le 24 octobre 1601. *Dès lors, il polémique contre les orbes solides, mais il faudra attendre 1588 pour qu'il publie* Sur les très récents phénomènes du monde éthéré (*De mundi aetheri recentioribus phenomenis*), *où il relate ses observations.* »

À Prague, Kepler profitera de l'énorme quantité d'observations effectuées par le Danois

Tout est donc à revoir sur la conception du monde. L'époque est tumultueuse, le débat sur l'héliocentrisme bat son plein. En 1584, le moine Giordano Bruno épouse les thèses de Copernic et écrit dans son *De l'infinito, universo e mondi* : « *Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept "terres" [la Terre, la Lune, et les cinq planètes alors connues : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, ndlr] que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche.* » Au terme de huit années de procès, il est brûlé vif, le 17 février 1600, à Rome.

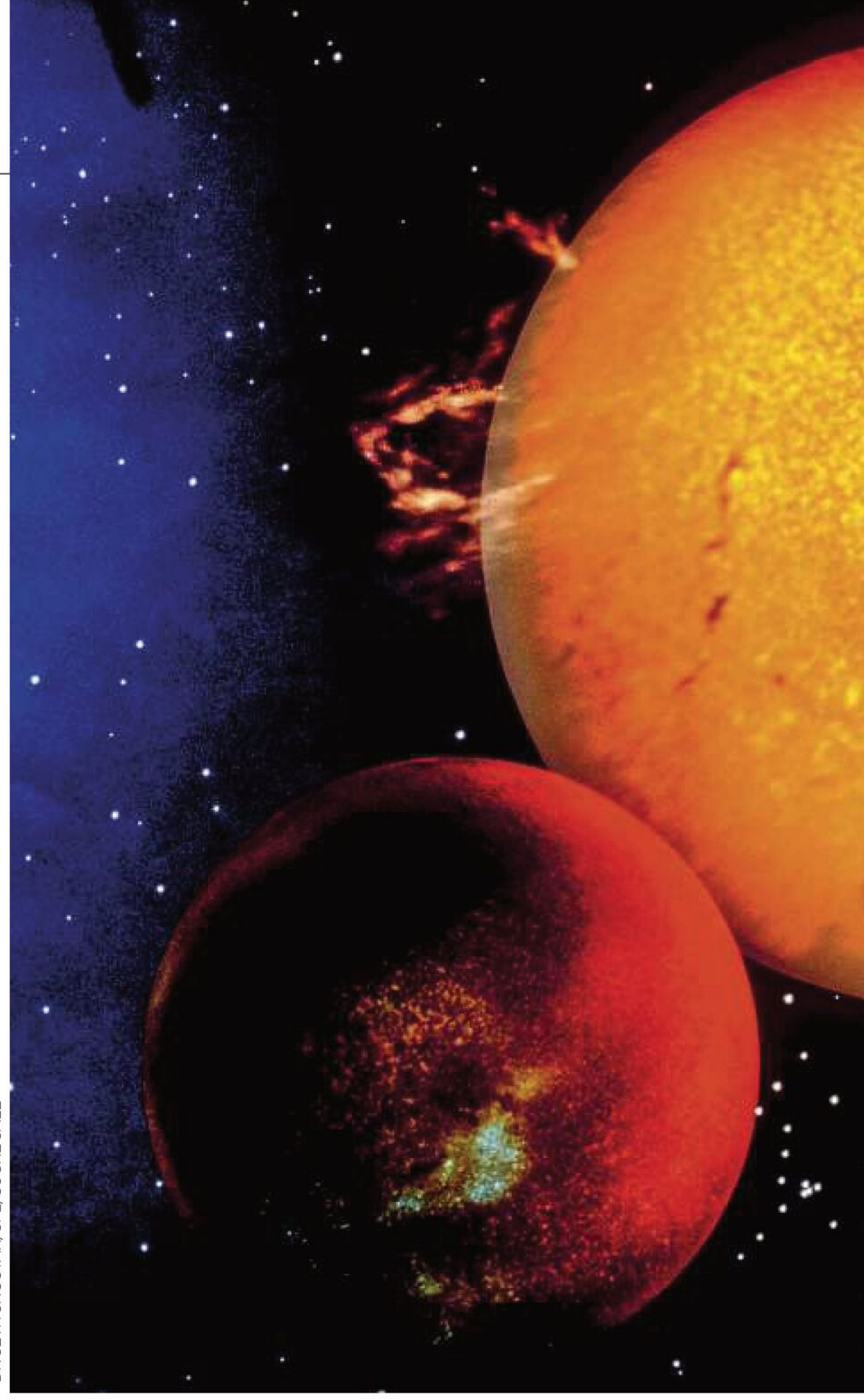
Tycho Brahe, tombé en disgrâce au Danemark, s'est alors exilé à Prague. Quelques mois avant sa mort, l'Allemand Johannes Kepler l'y rejoindra et profitera de l'énorme quantité d'observations effectuées par le Danois, notamment sur la position des planètes. Kepler pense que celles-ci suivent une orbite idéale en forme de cercle et tente d'appliquer cette théorie à Mars, mais les observations à la minute d'arc près de Tycho Brahe lui montrent qu'il se trompe. Il laisse alors tomber le cercle pour l'ellipse et parvient à décrire les orbites par les trois lois qui portent son nom. La cosmogonie aristotélicienne n'est décidément pas la bonne ! D'autant qu'en 1604, il observe lui aussi une nouvelle étoile « *plus brillante que Vénus* », cette fois-ci dans la constellation d'Ophiuchus. Le 9 octobre de cette année-là, elle surgit aux côtés de Jupiter, Saturne et Mars et reste visible pendant un an. Ce sera la dernière supernova visible à l'œil nu dans notre galaxie, la Voie lactée.

Du côté des instruments, l'époque est aussi à la révolution. En 1608, le Hollandais Hans Lippershey fait la démonstration d'une lunette d'approche : un tube muni de deux lentilles, l'une concave, l'autre convexe. L'année suivante, l'Anglais Thomas Harriot la pointe vers la Lune dont il observe le caractère irrégulier du terminateur, cette ligne séparant les parties éclairée et sombre de notre satellite. Quatre mois plus tard, l'Italien Galileo Galilei braque à son tour celle qu'il vient de construire vers la Lune, dont il observe les cratères, mais aussi vers le Soleil dont il détecte les taches, et vers Jupiter, autour de laquelle il repère quatre satellites. Mais ces premières lunettes présentent des défauts. Les images, notamment, sont floues. Kepler imagine alors de doter l'instrument de deux lentilles convexes… ce qui améliore nettement le résultat.

Pour recueillir davantage de lumière, il faut soit polir des lentilles de plus grande courbure, soit – plus simplement – allonger la focale, la distance entre la lentille et le foyer où convergent les rayons lumineux. S'ensuit alors une course au gigantisme. À Dantzig, entre 1673 et 1675, Johannes Hevelius monte sa « machine céleste », longue de 46 mètres ; ●●●

Les romans de Jean-Pierre Luminet :
Le Secret de Copernic, JC Lattès, 2006
La Discorde céleste, JC Lattès, 2008
L'Œil de Galilée, JC Lattès, 2009
La Perruque de Newton, JC Lattès, 2010

Pour les plus férus : Agnès Acker, *Astronomie, astrophysique*, Dunod, 2019



DR SETH SHOSTAK/SPL/SUCRÉ SALÉ

●●● celle du Hollandais Christiaan Huygens mesure 37 mètres. Lors de la création de l'observatoire de Paris, en 1667, Colbert avait donné le ton, en faisant fabriquer des lentilles de longueur focale supérieure à 50 mètres pour l'astronome italien Jean-Dominique Cassini. Comme c'est le cas des lunettes de Hevelius et de Huygens, ces lentilles ne sont pas intégrées dans un tube. L'observation se fait « sans tuyau ». À l'Observatoire de Paris, par exemple, « *les objectifs étaient placés sur le rebord de la terrasse ou dans une fente prévue à cet effet sur la tour orientale côté sud, ou plus tard sur une grande tour de charpenterie venue de Marly-la-Machine. L'alignement de l'objectif et de l'oculaire se fait à tâtons, au mieux en les reliant par un fil tendu* », écrit Laurence Bobis lors de l'exposition « Hommage à Jean-Dominique Cassini », organisée en 2012 à l'occasion du tricentenaire de la mort de l'astronome. La précision des mesures avoisine alors les 10 secondes d'arc. Avec cet instrument, Cassini découvre de nouveaux satellites de Saturne et la division principale des anneaux qui porte aujourd'hui son nom.

Des nébuleuses aujourd'hui étudiées pour comprendre la mort des étoiles massives

Ces lunettes ont bientôt un concurrent sérieux. En 1668, Isaac Newton construit son premier télescope, en comprenant qu'un miroir courbe concentre aussi bien la lumière qu'une lentille en verre. Mais ce n'est qu'en 1858 que le Français Léon Foucault sonnera le glas des lunettes, en remplaçant l'alliage de cuivre et d'étain qui recouvrait les miroirs des télescopes, et s'oxydait facilement, par du verre recouvert d'argent. Tandis qu'au même moment, Edmond Becquerel invente le premier spectrographe, qui analyse la lumière et permet de sonder l'intérieur des étoiles en détectant les raies lumineuses émises par la matière dont elles sont composées. « *C'est cette émergence de la spectroscopie qui marque le début de l'astrophysique* », déclare Jean-Pierre Luminet. Durant le XX^e^ siècle, les miroirs des télescopes s'agrandissent, permettant l'observation d'astres de moins en moins lumineux, donc de plus en plus lointains. La précision augmente alors jusqu'au dixième de seconde d'arc. Le bond en avant arrive avec l'avènement des télescopes en orbite. Le satellite d'astrométrie européen Hipparcos atteint 0,01 seconde d'arc en 1989. La palme revient aujourd'hui à son successeur Gaia, en service jusqu'en 2025, dont les mesures de position s'effectuent à 0,00003 seconde d'arc près, soit l'équivalent du diamètre d'un cheveu à une distance de 1 000 kilomètres ! Son dernier catalogue, publié en décembre dernier, contient la position, la couleur et le mouvement propre de pas moins de 1,8 milliard d'étoiles.

Si l'étoile nouvelle de Tycho n'a donc rien apporté en elle-même, hormis insinuer le doute dans l'esprit de l'astronome danois, elle a donc bel et bien lancé la course à la précision des observations. Mieux, elle a contribué à alimenter le débat sur la nature de notre planète : unique, la Terre ? N'est-elle pas, plutôt, juste une planète parmi d'autres ? Cette idée, initiée par Giordano Bruno, fut poursuivie par Bernard de Fontenelle en 1686 lors de la parution de ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*. Il y plaide pour une multiplicité de « *soleils dont chacun éclaire un monde* ». C'est dans cette tradition

OIPALE/LEEMAGE

« Sur le moment, l'étoile observée par Tycho Brahe n'a absolument rien changé. On refait souvent l'histoire des sciences à rebours ! »

Jean-Pierre Luminet, astrophysicien, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'astrophysique de Marseille

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #1

Chaque année, depuis trente ans, les Ig Nobel – lisez « ignoble » – couronnent des recherches absurdes mais qui prêtent à réflexion. Ces pastiches du Nobel sont décernés, à Harvard, par l'éditeur des Annals of Improbable Research... ***et en présence de véritables nobélisés.***

La crotte cubique du wombat

Pour faire honneur aux sciences dures, commençons par ce prix de physique remis en 2019 à trois scientifiques du Georgia Institute of Technology (États-Unis), qui ont découvert comment le wombat, un marsupial australien, fait des crottes cubiques. Pour percer le secret des déjections que ces animaux empilent pour communiquer et marquer leur territoire, Patricia Yang, spécialiste de la dynamique des fluides, s'est plongée dans leur intestin. Elle a observé qu'au passage des selles, la dernière partie de celui-ci ne s'étire pas uniformément, mais présente des sections dures et d'autres plus élastiques, ce qui aplatit certaines parties des excréments. Après la découpe et le moulage, le wombat nous livre une troisième méthode de production des cubes : la fabrication par tissus mous. Avec quel avenir industriel ?

FRANÇOIS FOLLIET

Une planète parmi tant d'autres...
Quatre siècles après les observations de Tycho Brahe, une première exoplanète, 51 Pegasi b, a été détectée. Grâce à des instruments toujours plus performants.

que s'inscrivent les recherches actuelles sur les planètes extrasolaires dont la première, 51 Pegasi b, a été découverte en 1995.

SN 1572, comme on appelle aujourd'hui ce qui reste de la *stella nova* de Tycho, est aussi une source importante pour la connaissance de l'évolution des étoiles. C'est aujourd'hui une nébuleuse formée par les restes de l'explosion. Trop faiblement lumineuse pour les instruments du XVIIIe siècle, elle ne fait pas partie des 110 astres d'apparence nébuleuse que le Français Charles Messier, à partir de 1758, a répertoriés afin de ne pas les confondre avec les comètes. Le premier, noté M1, situé dans la constellation du Taureau, sera nommé un siècle plus tard par William Parsons « nébuleuse du Crabe », en référence à sa forme. Ce n'est rien d'autre que le résidu d'une autre « étoile invitée » dont les astronomes chinois ont observé l'apparition entre 1054 et 1056.

L'étude de ces résidus d'étoiles bat aujourd'hui son plein. Elle tente notamment de comprendre la mort des étoiles massives et la manière dont elles fabriquent alors des éléments chimiques lourds. SN 1572 est scrutée assidûment par tous les grands télescopes sur Terre ou dans l'espace. En témoigne la dernière image du satellite Chandra, montrant les éjectas sous forme de grumeaux, qui proviendraient de l'explosion elle-même. L'étoile de Tycho n'en finit pas de révéler ses secrets... **JACQUES-OLIVIER BARUCH**

3 Questions

ANNE DECOURCHELLE
Astrophysicienne au Commissariat à l'énergie atomique

« On a pu observer des échos de la lumière émise lors de l'explosion »

ANNE DECOURCHELLE

Pourquoi nomme-t-on l'étoile de Tycho SN 1572 ?
Le chiffre vient de l'année où Tycho Brahe l'a découverte, 1572. Il a reporté les variations temporelles de l'intensité de sa nouvelle étoile dans *De Stella Nova* en 1573, puis dans *Progymnasmata*, publié en 1602, après sa mort. Quant au terme de supernova (SN), ce n'est que dans les années 1930 qu'il a été introduit, par l'Allemand Walter Baade et l'Américain Fritz Zwicky, pour désigner ces novae très brillantes qui correspondent non pas à de nouvelles étoiles, mais à l'explosion d'étoiles en fin de vie. Sur la base des mesures de Tycho Brahe, Walter Baade a conclu en 1938 que celle observée par le Danois était une supernova et a précisé, en 1945, qu'elle était de type Ia. Ce qui correspond à un système double où une petite étoile vieillissante, une naine blanche, avale tellement de matière de sa compagne qu'elle explose et qu'il n'en reste rien, hormis la matière éjectée que l'on peut observer aujourd'hui. Quant à l'évaluation précise de la distance de SN 1572, elle varie du simple au quadruple. Un récapitulatif, effectué en 2010 par une équipe japonaise menée par Asami Hayato, de l'institut Riken, donne en effet des valeurs allant de 4800 à plus de 19 000 années-lumière, selon les modèles utilisés.

A-t-on retrouvé son étoile compagne ?
Quelques candidates ont été identifiées, mais le débat reste ouvert… même si l'une d'entre elles, nommée Tycho-G, est privilégiée. En attendant, c'est le résidu de l'explosion qui est le plus étudié. On l'observe dans toutes les longueurs d'onde, depuis les ondes radio, dès 1950, jusqu'aux rayons gamma de très haute énergie depuis 2011.

Pourquoi cet intérêt ?
C'est l'une des quelques supernovae historiques, et l'une des rares pour lesquelles on a pu observer les échos de la lumière émise lors de l'explosion sur des nuages interstellaires, ce qui a permis de confirmer sa nature de supernova de type la normale. Lors de ce type d'événement, la matière de l'étoile, éjectée à des dizaines de milliers de kilomètres par seconde, se heurte à la matière interstellaire, générant une double structure de chocs. Ces chocs compriment et chauffent à des dizaines de millions de degrés la matière qui émet en rayons X. On observe ainsi les raies d'émission du silicium, du soufre et du fer, ce qui permet de quantifier les éléments produits et éjectés lors de l'explosion, et même la signature de particules accélérées, source des rayons gamma détectés. Les observations du reste de SN 1572 et leurs confrontations aux modélisations contribuent donc à la compréhension de la physique de l'explosion, de la physique des chocs et de l'accélération des rayons cosmiques.

HASARD

Rite initiatique ou récit de noces ? L'interprétation des fresques qui ornent la villa des Mystères, mise au jour en 1909, divise toujours les experts.

COLLECTION DAGLI ORTI / VILLA DES MYSTÈRES POMPEII/AURIMAGES

LE PRINCE, LE PAYSAN ET LA CITÉ ENSEVELIE

Un bloc de marbre trouvé lors du creusement d'un puits, et c'est le début d'une chasse aux trésors… Avant que le premier chantier archéologique de l'histoire ne ressuscite Pompéi la somptueuse, oubliée depuis des siècles.

« Les siècles futurs pourront-ils croire, quand les moissons repousseront et qu'enfin reverdiront ces déserts, que des villes et des populations sont englouties sous leurs pieds et que les campagnes de leurs ancêtres ont disparu sous une mer de feu ? », se demandait le poète latin Stace, une quinzaine d'années après l'éruption du Vésuve qui, en 79, figea Pompéi sous les lapilli et les cendres. Il n'imaginait pas que la cité de Campanie, brutalement effacée de la carte, disparue des mémoires, ne resurgirait que… dix-sept siècles plus tard, donnant naissance au premier grand chantier archéologique de l'histoire.

Sans les labours de paysans locaux exhumant ses vestiges, sans l'ambition des têtes couronnées du XVIIIe siècle avides d'antiquités, Pompéi aurait pu rester enfouie quelques centaines d'années de plus. Son nom même s'était perdu. Au point qu'en 1592, lorsque l'architecte Domenico Fontana construit un canal pour amener l'eau du fleuve Sarno à la ville côtière de Torre Annunziata, il creuse à côté de l'amphithéâtre de la cité sans même s'en apercevoir ! Et la découverte d'une inscription mentionnant un décurion de Pompéi ne provoque aucune ●●●

Le site de la villa de Diomède : http://villadiomede.huma-num.fr/3dproject/

William Van Andringa, *Pompéi. Mythologie et histoire,* CNRS Éditions, 2013

●●● réaction. « *Incroyable, quand on y réfléchit !* s'étonne encore William Van Andringa, directeur d'études à l'École pratique des hautes études, qui fouille depuis vingt ans les nécropoles de Pompéi. *C'est le nom de Pompée qui vient à l'esprit des ingénieurs quand ils découvrent l'inscription ! Pensez que ce canal traverse la cité antique… La science qui permet d'identifier les vestiges n'est pas encore née.* » La verdure reprend ses droits, seul le nom de la colline, Civita, évoque la cité.

En 1748, l'ingénieur Alcubierre prélève peintures et mosaïques… puis remblaie !

La seconde vie de Pompéi va commencer par hasard grâce à Herculanum, la ville voisine ensevelie elle aussi par le volcan. Et au duc d'Elbeuf qui, en 1710, en quête de matériaux pour construire une villa à Portici, dans la baie de Naples, achète à un paysan du marbre trouvé lors du creusement d'un puits. Comprenant que la pierre provient d'antiquités romaines, l'aristocrate rachète ses terres au villageois ; il met rapidement au jour une statue d'Hercule et trois autres de femmes, intactes, qu'il envoie à Vienne. La nouvelle s'ébruite et finit par attirer l'attention de Charles de Bourbon (1716-1788), alors roi de Naples et de Sicile… et féru d'antiquités. Il acquiert la villa de Portici, relance les recherches. Il s'avérera que le puits du paysan était situé juste au-dessus du théâtre d'Herculanum… cité qui sera découverte en 1738.

H. DESSALES

« Pompéi a énormément apporté à la connaissance de l'urbanisme romain. Avec un bémol : les autres sites sont lus à travers son prisme. Or, c'était une ville hors norme, car elle était en reconstruction »

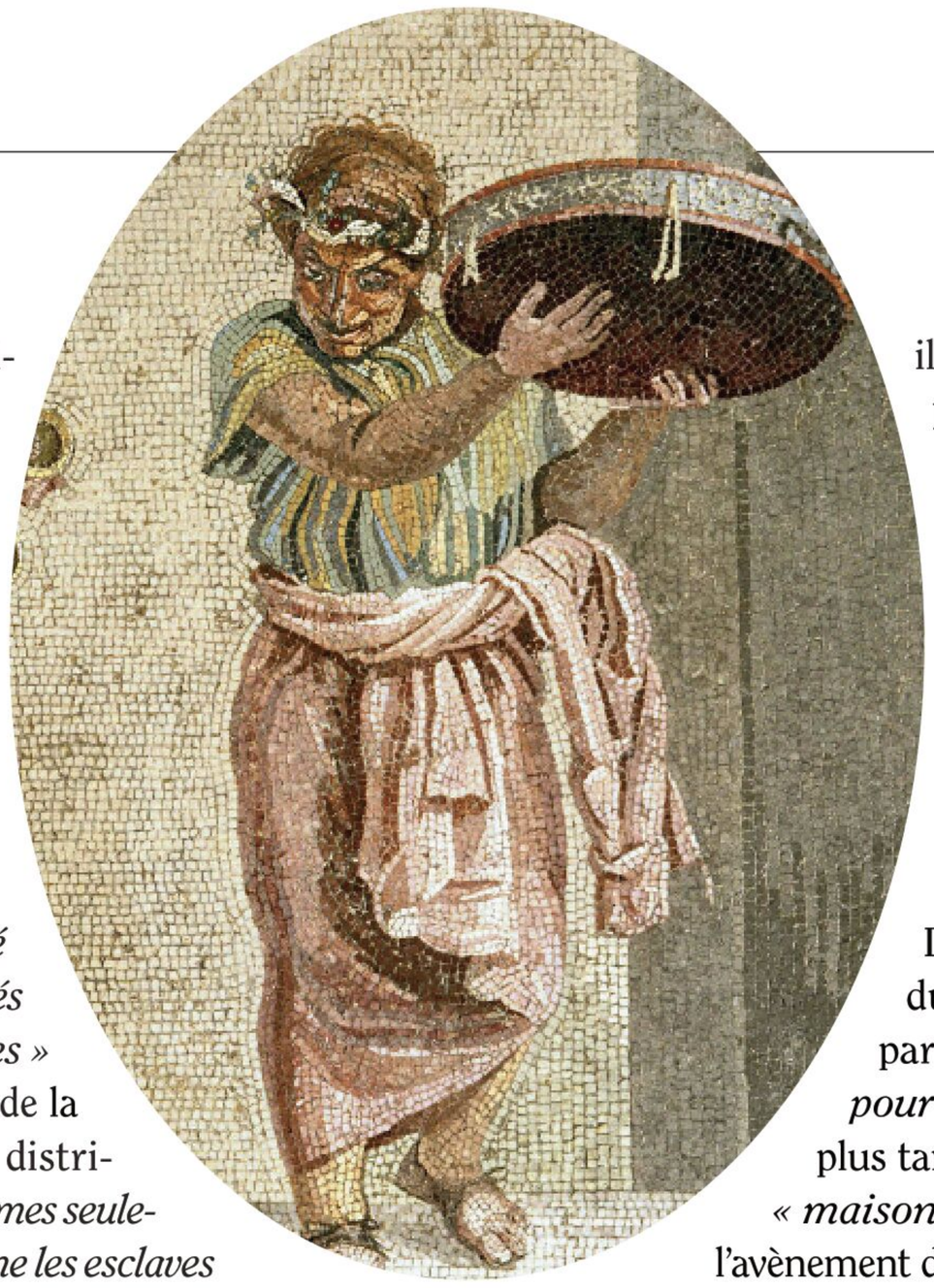
Hélène Dessales, maîtresse de conférences à l'École normale supérieure

« *Les fouilles de Pompéi n'auraient pas eu lieu sans celles d'Herculanum,* explique Sandra Zanella, maîtresse de conférences en histoire et archéologie antiques à l'université Côte d'Azur. *Il y a une part de chance dans la redécouverte des cités de Campanie, même si tous les habitants avaient conscience que des vestiges importants se trouvaient là.* » Pour l'heure, on ne parle pas de fouilles, encore moins d'archéologie. Le souverain, qui veut décorer son palais et asseoir son prestige, se lance plutôt dans une chasse au trésor, récupérant bijoux, fresques, colonnes… De précieux vestiges dont regorge également Civita. Il faudra néanmoins attendre dix ans pour que, le 13 mars 1748, Alcubierre, un ingénieur arpenteur mandaté par le roi, ouvre un premier chantier sur cette colline. Il comprend qu'il met au jour une ville mais croit qu'il s'agit de Stabies, située en réalité plus au sud. L'ingénieur utilise une méthode de type minier, creusant d'abord un puits puis un réseau de galeries. Il exhume des tables, des coffres, des candélabres en bronze, des restes de lit, des colonnes de marbre, des margelles, des puits… Il récupère des pans de murs avec leurs peintures, retire les mosaïques… puis remblaie ! Le travail ne diffère guère de celui des pilleurs qui avaient sévi au lendemain de l'éruption…

Alcubierre est vertement critiqué par les savants qui font le voyage à Naples. L'Allemand Johann Joachim Winckelmann (1717-1768), grand spécialiste

ALINARI / ROBERT RIVE / ROGER-VIOLLET

Chantier bien ordonné. À partir des années 1860 (ici vers 1870), le site sera étudié méthodiquement selon les principes de la stratigraphie : les couches d'occupation humaine sont mises au jour les unes après les autres afin d'établir leur chronologie.



STEPHANE COMPOINT/ ONLYWORLD.NET

Musicien ambulant. Cette mosaïque provient de la villa de Cicéron, l'un des premiers vestiges exhumés au XVIIIe siècle.

de l'art antique, considéré comme un pionnier de l'archéologie car, par ses lettres, il révéla Pompéi à l'Europe, le décrit comme un homme ayant *« aussi peu de rapport avec les antiquités que la Lune en a avec les écrevisses »*. Il l'accuse d'avoir *« causé par son peu de capacités la perte de belles choses »* et s'étonne également de la mollesse des travaux distribués à *« cinquante hommes seulement en comptant même les esclaves d'Alger et de Tunis »*.

Au fil des ans, Pompéi va toutefois ravir la vedette à ses voisines : les lapilli qui ont recouvert le site sont beaucoup plus légers, et le travail s'y avère plus facile. Mais le nom n'est clairement identifié qu'en 1763, lorsque les ouvriers mettent au jour un marbre portant l'inscription *res publica pompeianorum*. Cette année-là, les autorités chargent maçons et forgerons de restaurer les ruines. Les bâtiments sont laissés à l'air libre. Et les découvertes spectaculaires s'enchaînent : l'Odéon en 1764, le temple d'Isis quelques mois plus tard, les dix-huit premiers corps en 1772, dans la villa de Diomède… On doit aux deux assistants d'Alcubierre la préservation de ces premiers vestiges. L'un d'eux, Francesco La Vega, officier du génie formé à Rome, *« fait venir des peintres napolitains qui copient les peintures, reproduisent les mosaïques. Il positionne et décrit tous les objets »*, explique Hélène Dessales, maîtresse de conférences à l'École normale supérieure, spécialiste de Pompéi. Très cultivé, il a lu les traités en latin et entretient des liens avec les intellectuels de l'époque. *« Les études des rapports de fouilles nous amènent aujourd'hui à nuancer l'idée de recherche aveugle et de pillage qu'on a longtemps associée à cette époque,* poursuit la chercheuse. *Nous découvrons que se manifeste alors, et pour la première fois, une conscience patrimoniale. »*

Jusqu'en 1810, Pompéi demeure néanmoins le domaine réservé des souverains, qui ne délivrent d'autorisations de visite qu'aux voyageurs prestigieux et imposent le secret : interdiction d'y prendre des notes ou de dessiner ! Mozart visite Pompéi en 1770 avec son père, s'extasie devant le temple d'Isis, dont il s'inspirera pour composer *La Flûte enchantée*, Théophile Gautier prend la villa de Diomède comme cadre d'une de ses nouvelles. Mais certains visiteurs, habitués aux grands monuments, se montrent déçus. En 1777, Vivant Denon, futur directeur du musée du Louvre, parle de maisons *« faites pour des nains »* ; dix ans plus tard, Goethe évoque des *« maisons de poupée »*. Avec l'avènement du mouvement romantique, la ville saisie par la mort inspire les écrivains : Chateaubriand en 1804, Mme de Staël l'année suivante, ou encore Stendhal, en 1817.

Non plus trouver des objets antiques, mais connaître le passé

Lors de l'occupation du royaume de Naples par les Français, de 1806 à 1815, Caroline Murat, sœur de Napoléon, investit des sommes considérables dans le chantier, sur lequel elle se rend régulièrement et où l'on dénombre jusqu'à 1 000 ouvriers chaque jour. Une ville apparaît. Le but n'est plus de trouver des objets antiques, mais de connaître le passé. *« Cet intermède français marque le premier chantier urbain de fouilles,* précise Hélène Dessales. *Avec la volonté de dégager une ville entière sur une superficie de plus de 60 hectares. Caroline a demandé à l'architecte François Mazois de relever l'intégralité du site : il a publié quatre volumes de référence. »*

Le retour au pouvoir des Bourbons brise cet élan. Les souverains s'intéressent moins à Pompéi. Mais en 1860, Garibaldi, artisan de l'unité italienne, entre dans Naples et les chasse du pouvoir. Il propose la direction des fouilles à… son ami le romancier Alexandre Dumas, dont le mandat ne sera qu'éphémère. Avec l'unification du royaume d'Italie, en 1861, les pratiques se professionnalisent : le nouveau surintendant de Pompéi, l'archéologue Giuseppe Fiorelli, divise le site en neuf régions, mène les fouilles par quartier, protège les fresques qu'il laisse *in situ*. Il applique la méthode stratigraphique, empruntée à la géologie et déjà utilisée sur des sites préhistoriques. Il dégage les maisons par le toit, creusant vers le bas. Fiorelli est également l'inventeur d'une technique qui ●●●

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #2

Quitte à prendre un placebo, mettez-y le prix

L'efficacité du placebo varie selon le prix. Plus il est cher et plus il soigne ! Ce constat pécuniaire a valu l'Ig Nobel de médecine 2008 à une équipe de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ils ont recruté 82 volontaires, soumis à des décharges allant jusqu'à 80 volts après leur avoir donné à tester un analgésique, en réalité un placebo. Sur les deux groupes formés, le premier a reçu une pilule à 2,50 dollars et le deuxième une pilule à prix réduit de 10 cents. Résultat : 85,4 % des participants ayant consommé le placebo le plus cher relèvent une diminution notable de la douleur, contre 61 % pour ceux ayant pris le placebo au rabais. Cette incidence thérapeutique du prix démontre l'importance de la présentation du médicament. Elle explique aussi l'engouement pour les thérapies onéreuses, ainsi que l'efficacité réduite des médicaments génériques rapportée par les patients. La santé nous est si chère !

F. F.

LUIGI SPINA / PRESS OFFICE OF THE POMPEI ARCHAEOLOGICAL PARK / AFP

●●● marque les esprits : il injecte du plâtre dans les cavités formées par les corps des victimes pris dans la gangue éruptive. Ces moulages restituent l'attitude des Pompéiens au moment où la mort les a saisis.

Le célèbre lupanar renaît des cendres en 1862. Quelques décennies plus tard, la rue de l'Abondance est dégagée sur 600 mètres, dévoilant un pan entier de paysage urbain avec ses façades, ses bâtiments à étages, ses commerces… À partir de 1925, le superintendant Maiuri recherche les niveaux archaïques de la cité afin de comprendre son passé avant l'époque romaine. Il s'attache également à restituer au moment de l'éruption cette cité commerçante d'environ 10 000 habitants, connue pour l'artisanat de la laine et pour ses parfumeries.

Bistrot romain. Ce comptoir de restauration rapide, ou *thermopolium*, a été découvert en décembre dernier dans un état de conservation exceptionnel. On y servait du vin et des plats chauds dont les archéologues ont retrouvé les restes : canard, porc, chèvre, poisson et même escargots.

Depuis, l'intérêt pour Pompéi ne s'est jamais démenti. « *C'est un des sites les plus dessinés et les plus photographiés au monde, qui nous permet aussi de suivre l'histoire des fouilles et celle du tourisme, car il fut d'abord réservé à quelques privilégiés avant de devenir un parc archéologique payant,* constate Hélène Dessales. *Ce chantier a énormément apporté à la connaissance de l'urbanisme romain, avec toutefois un effet d'interprétation risqué : les autres sites romains sont encore aujourd'hui lus à travers son prisme. Or Pompéi est une ville hors norme, notamment parce qu'elle était en reconstruction au moment de la catastrophe : environ un tiers en avait été démoli par un tremblement de terre moins de vingt ans auparavant. Des bâtiments comme la villa de Diomède n'étaient même plus habités. Et certains objets sont parfois sans aucun rapport avec la pièce où ils reposent : ils étaient stockés en attendant les travaux.* »

Un tiers du site reste à fouiller

Un *thermopolium*, fast-food de l'Antiquité, deux individus surpris dans leur fuite par l'éruption, une fresque représentant Léda, personnage de la mythologie grecque, une mosaïque d'Orion… Les annonces de découvertes se sont enchaînées depuis 2018 à Pompéi, qui frôlait les 4 millions de visiteurs par an avant la pandémie. Car, pour la première fois depuis la Seconde Guerre mondiale, des fouilles explorent un secteur encore enfoui jusqu'ici, la Regio V. Sur les 66 hectares que couvre Pompéi, 22 encore n'ont en effet jamais été fouillés.

Ce nouveau chantier s'inscrit dans le cadre du Grand Projet Pompéi. Financé par le gouvernement italien et l'Europe, et destiné au départ à consolider et restaurer les bâtiments déjà mis au jour, il bénéficie des techniques de pointe. Archéologues, ingénieurs et architectes utilisent la cartographie laser réalisée à partir de drones ainsi que la thermographie infrarouge afin de positionner chaque maison ou objet, et de reconstituer en 3D des bâtiments. Une équipe internationale dirigée par Hélène Dessales a mené le projet consacré à la villa de Diomède, l'une des premières demeures aristocratiques de Pompéi à avoir été exhumée. La maison se visite aujourd'hui de manière interactive en 3D.

Ces nouvelles méthodes permettent de revisiter certaines conclusions établies aux siècles précédents. Un homme surnommé le Mendiant portait en réalité des chaussures de luxe, l'examen du cuir montrant qu'il était d'excellente qualité. Et passés au scanner, les moulages de Fiorelli révèlent d'après l'état du crâne et des os que de nombreuses victimes ont péri non par suffocation, mais écrasées sous l'effondrement de leur maison.

Les « amants » enlacés : deux hommes, selon l'analyse ADN de leurs squelettes

« Il ne suffit pas d'enlever les pierres ponces crachées par le Vésuve pour comprendre comment vivaient les gens, approuve Nicolas Monteix, maître de conférences à l'université de Rouen. *Pompéi a biaisé notre vision et produit beaucoup de fantasmes, en particulier celui d'une ville figée, comme sur une photographie. En fait, les situations observées lors des fouilles ont été fortement perturbées avant, pendant et après l'éruption. »*

Certains exemples témoignent bien de ces erreurs possibles : ainsi, les deux squelettes enlacés appelés « les amants », un homme et une femme dans l'esprit de tous. L'analyse ADN a révélé qu'il s'agissait de deux hommes, peut-être deux voisins, deux amis… ou amants. Il est des secrets que Pompéi gardera pour l'éternité.

SYLVIE BRIET

En 1947, la découverte des manuscrits de la mer Morte, cachés dans des jarres elles-mêmes dissimulées dans des grottes, suscite de nombreux fantasmes. Une histoire loin d'être terminée.

Et Isaïe revit enfin le jour…

La légende veut qu'un chevreau égaré dans une grotte du désert de Judée soit à l'origine de l'une des plus spectaculaires découvertes archéologiques du XXe siècle : celle des rouleaux de la mer Morte. Les plus anciens manuscrits conservés de la Bible hébraïque. Si la réalité s'avère un peu plus complexe, elle relève tout de même en partie du hasard. En 1947, c'est bel et bien dans des grottes, près de Khirbet Qumrân (en arabe « la ruine de Qumrân »), que des Bédouins de la tribu des Ta'amireh débusquent des parchemins anciens, certains conservés dans de grandes jarres, et qui seront appelés le Grand Rouleau d'Isaïe, la règle de la Communauté et le Commentaire d'Habaquq. Des peaux dont ils ignorent la valeur. Quelques mois plus tard, quatre autres parchemins sont à leur tour exhumés : un second Rouleau d'Isaïe, le règlement de la Guerre, les Hymnes et l'Apocryphe de la Genèse.

L'aventure de ces textes ne fait que débuter ! Deux ans plus tard, et tandis qu'un premier conflit israélo-arabe, consécutif à la création de l'État juif, a embrasé la région, des archéologues du département des Antiquités de Jordanie, du Musée archéologique de Palestine et de l'École biblique de Jérusalem apprennent l'existence de manuscrits trouvés du côté de la mer Morte. La parution d'une petite photographie publiée dans une revue américaine a attiré leur attention. Ces savants se souviennent de témoignages antiques du Père de l'Église Origène (IIIe siècle) et de son élève Eusèbe de Césarée, qui évoquaient déjà des manuscrits (non bibliques) trouvés dans des grottes aux environs de Jéricho. De véritables expéditions vont alors être montées, dans des conditions difficiles, puisqu'il n'existe alors aucune route pour rejoindre Qumrân. Mais l'obstination paiera. Les archéologues de l'École biblique de Jérusalem finissent par retrouver les premières caches. Celles-ci sont situées dans les falaises escarpées de la rive occidentale de la mer Morte, en territoire jordanien. Entre 1949 et 1956, onze grottes abritant plus de 900 manuscrits bibliques et des milliers de fragments seront ainsi localisées.

EDDIE GERALD/GETTY IMAGES

Puzzle biblique. À côté de rouleaux quasi complets, les archéologues ont mis la main sur près de 25 000 fragments de manuscrits qu'ils reconstituent (ici, en les cousant) grâce à l'ADN des peaux utilisées.

Des éléments de parchemins liés aux douze petits prophètes

Jusqu'à ces découvertes exceptionnelles du XXe siècle, seuls des textes rabbiniques médiévaux et une traduction de la Bible hébraïque en grec, appelée la Septante, étaient connus des spécialistes. Avec les manuscrits de la mer Morte, tout change. Les scientifiques se retrouvent pour la première fois en possession de textes religieux originaux, écrits en hébreu par des communautés juives, ce qui les propulse d'un coup aux origines véritables du Livre… il y a plus de deux mille ans ! De même découvrent-ils des textes apocryphes – non retenus par la suite dans le canon de la Bible hébraïque. L'ensemble des documents, datés du IIIe siècle av. J.-C. au Ier siècle de notre ère, sont aujourd'hui sous la responsabilité d'Israël, et, pour leur majorité, conservés à Jérusalem, dans le Sanctuaire du Livre (Heykhal ha-Séfèr). Mais l'histoire de ces découvertes ne semble pas vouloir s'arrêter… En 2020, une grotte située dans la réserve naturelle de Nahal Hever, près d'Hébron, a livré des éléments de parchemins liés aux douze petits prophètes de la Bible. Les premiers fragments bibliques officiellement retrouvés depuis… soixante ans !

BERNADETTE ARNAUD

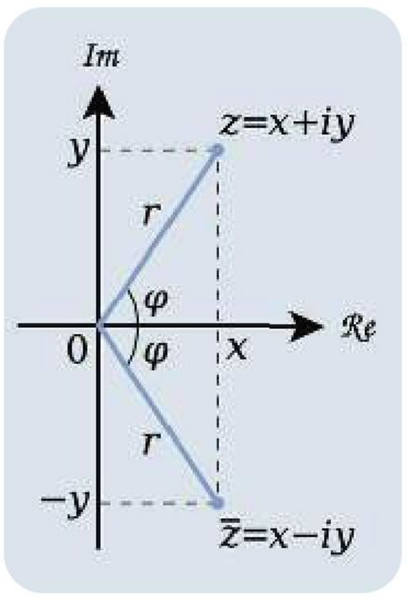
LA TROUBLANTE RÉALITÉ DES MATHÉMATIQUES

Il semble n'y avoir que deux options : soit les objets mathématiques préexistent à leur découverte, soit… non. L'exemple des nombres complexes prouve cependant que la réponse n'est pas si simple.

Découvrir ou inventer les mathématiques ? Une question aussi vieille que les mathématiques elles-mêmes, et intimement liée à une seconde, tout aussi délicate, sur la nature des objets qu'elles manipulent : si les concepts mathématiques préexistent, alors le mathématicien est un découvreur, dont le travail s'apparente à celui du botaniste parcourant une forêt à la recherche d'une nouvelle plante ; si l'on part au contraire de l'idée que les objets mathématiques n'ont pas de réalité conceptuelle préalable, la recherche va consister soit à les construire pour résoudre des problèmes « pratiques », à la façon d'un ingénieur, soit à les créer *ex nihilo*, tel un artiste.

On le sait, cette dernière opinion n'était pas celle de Pythagore et de ses disciples, selon lesquels « tout est nombre ». Mais c'est à Platon qu'il reviendra, quelques décennies plus tard, de bâtir la première théorie épistémologique sur le sujet : selon lui, les mathématiques sont constituées d'êtres extérieurs à l'activité humaine.

Une assertion qui a fait florès ! Car depuis lors, c'est par rapport au platonisme que tous les philosophes des sciences, et bon nombre de mathématiciens eux-mêmes, ont essayé de définir la nature de la pensée mathématique, et donc de la démarche intellectuelle sous-jacente. Si certains se tiennent à bonne distance de la question *(lire l'interview p. 24)*, d'autres revendiquent fermement leurs convictions. Au XXe siècle, par exemple, l'un des plus grands mathématiciens, Alexandre Grothendieck, s'affirmait résolument platonicien : *« La structure d'une chose n'est nullement une chose que nous puissions "inventer". Nous pouvons seulement la mettre à jour patiemment, humblement en faire connaissance, la "découvrir". [...] Les "structures" [...] ne nous ont nullement attendus pour être, et pour être exactement ce qu'elles sont* (1)*! »*



Représentation géométrique d'un nombre complexe.

Mais pour mieux cerner le statut des objets mathématiques, il peut être intéressant de prendre un exemple relativement élémentaire, celui des nombres complexes (2), à la longue et riche histoire. Celle-ci commence à la Renaissance lorsque des mathématiciens italiens, Raphaël Bombelli, Jérôme Cardan, Ludovico Ferrari et Niccolò Fontana (surnommé Tartaglia), cherchent à résoudre des équations de degré 3 ou 4, c'est-à-dire à trouver les valeurs x réelles satisfaisant une équation de la forme $ax^4+bx^3+cx^3+dx+e=0$ (avec les notations actuelles), où les lettres a, b, c, d et e désignent des paramètres connus. Petit à petit émergent des méthodes permettant une telle résolution, mais qui reposent sur une étape « mystérieuse » comportant un nombre « imaginaire » dont le carré est -1.

Pour ces mathématiciens, il s'agit d'un artifice de calcul, d'un intermédiaire entre l'équation initiale et les solutions réelles tant convoitées. Il ne fait aucun doute qu'alors, les nombres complexes sont une invention pratique plus qu'un concept profond. Une forme de méfiance accompagne d'ailleurs leur

FRANÇOISE MARTIN

« Des expérimentations manuelles m'amènent à me forger une intuition voire à obtenir des conjectures, que je teste à plus grande échelle par de la programmation »

Viviane Pons, maîtresse de conférences à l'université Paris-Saclay

CRÉATIVE COMMONS, DOMAINE PUBLIC

Magnifiques courbes fractales, les ensembles de Julia tel celui-ci sont fondés sur les nombres complexes. Le statut de ces derniers a évolué au cours des siècles : considérés à la Renaissance comme un simple artifice de calcul, ils sont aujourd'hui vus comme si naturels qu'ils en acquièrent la dignité d'un concept.

Fabio Toscano, *La Formule secrète. Le duel mathématique qui enflamma l'Italie de la Renaissance*, Belin, 2011

Adrien-Quentin Buée, *Mémoire sur les quantités imaginaires*, Bulmer & Company, 1806 http://sciav.fr/buee

Marco Panza et Andrea Serini, *Introduction à la philosophie des mathématiques. Le problème de Platon,* Flammarion, 2013

utilisation ; on leur accole des qualificatifs comme « inexplicables » ou « impossibles », et l'on hésite sur leur statut ontologique… mais on continue pragmatiquement de les manipuler.

Et si cette invention du XVIe siècle n'était pas, finalement, une découverte ?

Au XVIIIe siècle, des mathématiciens comme Abraham de Moivre et Leonhard Euler découvrent que les complexes entretiennent des liens profonds avec les fonctions trigonométriques sinus et cosinus qui sont le quotidien des scientifiques depuis plusieurs siècles : on peut écrire un nombre complexe sous la forme $r \cos \theta + i\, r \sin \theta$ avec $r>0$ et un angle θ. Permettant de résoudre davantage d'équations, l'outil gagne en puissance explicative… et le concept en légitimité. Par la suite, plusieurs savants réalisent indépendamment que les complexes sont bien davantage qu'un outil d'algèbre : tout d'abord un mathématicien isolé, Caspar Wessel, mais ses travaux, publiés en 1797, ne passent pas les frontières de son pays, le Danemark ; ensuite, un prêtre réfractaire en exil, Adrien-Quentin Buée, qui écrit – entre deux textes contre-révolutionnaires – un traité de mathématiques (1806) dans lequel il propose une vision géométrique résumée d'une élégante formule : « √-1 *est l'unité de la perpendicularité* » ; enfin, la même année, à Paris, Jean-Robert Argand, un libraire suisse mathématicien à ses heures, change définitivement le statut des complexes : il publie un mémoire dans lequel il associe chaque point du plan à un nombre complexe (ce que l'on appelle l'affixe d'un point). De simples intermédiaires permettant de résoudre une équation, les complexes se transforment en concept sous-jacent à toute la géométrie plane. Et apparaissent comme une description à la fois élémentaire et profonde des points, des vecteurs, des transformations du plan… Et si l'invention du XVIe siècle n'était pas, finalement… une découverte qui s'ignorait ?

Alors que la question reste sans réponse évidente, les complexes continuent de fournir des approches alternatives à d'autres sujets. Par exemple, on sait depuis le mémoire de Bernhard Riemann, rédigé en 1859, que la répartition des nombres premiers est intimement liée à l'étude d'une fonction, notée ζ, à argument et valeurs complexes (une conjecture rendue célèbre sous le nom d'hypothèse de Riemann) ; là encore, difficile de prévoir l'irruption des complexes en arithmétique si l'on réduit le concept à l'invention de la Renaissance ! Dans un autre domaine, comment ignorer que de magnifiques courbes fractales comme les ensembles de Julia sont en fait la ●●●

66interview

OLGA PARIS-ROMASKEVICH
Mathématicienne, chargée de recherche au CNRS

« En maths, nous pouvons découper une orange en deux oranges de même taille »

Pouvez-vous nous dire en quoi consiste votre domaine, les systèmes dynamiques ?
La dynamique, c'est le mouvement, par opposition à la statique. Étudier un système dynamique revient à définir le changement instantané d'un phénomène évolutif. Par exemple, on peut associer à l'éclosion d'une fleur une succession de photographies prises toutes les secondes : d'une photo à la suivante, on voit le mouvement de la fleur. Mon but de dynamicienne est de comprendre ce qui se passerait dans un temps très long si l'on poursuivait ces suites de photos. Dans cet exemple, la fleur finit par faner et la dynamique s'arrête ! Mais pour les systèmes dynamiques, le moment intéressant se trouve « à l'infini ». Le but est de comprendre le mouvement à l'infini dans toute sa généralité, et sans avoir à tester toutes les évolutions, toutes les trajectoires.

PHILIPPE SCHULLER/SIGNATURES POUR SCIENCES ET AVENIR

Depuis quand ce domaine existe-t-il ?
Il est tout jeune comparé à la théorie des nombres, qui est apparue il y a des millénaires, en même temps que la pensée mathématique. Les systèmes dynamiques se sont développés au milieu du XIXe siècle autour de questions liées à la compréhension du mouvement de planètes. Depuis, le domaine a explosé, et cette question n'en représente plus qu'une parmi beaucoup d'autres. Pour ma part, je m'intéresse au sous-domaine des billards dans les pavages.

Trajectoires, billards, pavages… Ces mots simples et concrets ont-ils ici le même sens que dans la vie courante ?
Les mathématiques sont faites par les humains, elles sont ancrées dans notre langage. Elles lui empruntent certains mots de tous les jours pour n'en conserver qu'un sens très précis. Le billard mathématique n'est pas un billard au sens habituel, à savoir une table rectangulaire avec des trous et des boules. Nos tables de mathématiciens peuvent avoir n'importe quelle forme et n'ont pas de trous. Nos boules sont réduites à des points, elles ne subissent aucun frottement et roulent donc indéfiniment. En revanche, la loi décrivant leurs rebonds demeure, tout comme l'intuition première, l'image naïve issue du monde physique : je trouve le mot billard très bien choisi.

Dans ce cas, le concept s'inspire de la réalité physique, mais il semble vivre dans l'univers mathématique… qui serait un peu en dehors de celle-ci ?
Un des pères fondateurs des systèmes dynamiques au début du XXe siècle, Henri Poincaré, voulait comprendre l'éventuelle stabilité du Système solaire – rien de plus réel que le futur de notre planète ! Les mathématiciens sont donc partis de motivations physiques, puis ont construit des modèles. Au fur et à mesure qu'ils les ont étudiés, ils ont trouvé des mathématiques intéressantes en elles-mêmes, qui n'avaient plus besoin de la physique pour les nourrir. Le lien avec la physique reste pourtant fort. J'ai commencé à étudier les billards dans les pavages, touchée par leur beauté mathématique. Puis ils se sont avérés liés aux propriétés de conductivité des métaux. Cet exemple est typique.

Si les objets mathématiques sont déconnectés de la physique, la démonstration d'un nouveau théorème ou l'introduction d'un nouvel objet est-elle une invention ou une découverte ?
C'est une question pour une philosophe des sciences plutôt que pour une mathématicienne ! À mon avis, lui donner une réponse dans un sens ou dans l'autre ne change rien à la pratique de la recherche. Personnellement, je me soucie plutôt des liens entre les objets et leurs propriétés, je n'ai pas besoin de savoir s'ils sont réels ou non. La seule chose qui m'importe est d'arriver à en avoir une image mentale. Si je peux travailler avec elle, cela me suffit. L'histoire de la compréhension des nombres complexes est un bon exemple de cette façon de faire.

Comment la démarche créative se met-elle en place chez une mathématicienne ?
Je ne sais pas ! Mais j'ai remarqué que les matheux sont intéressés, voire obsédés par cette question, et par la façon de réfléchir

en elle-même. Claire Voisin, une géomètre algébriste contemporaine, dit que faire des maths, c'est se regarder réfléchir. J'aime beaucoup cette description. Mais comment viennent les idées ? Si je connaissais un algorithme exact pour en obtenir de bonnes, je l'appliquerais jour et nuit ! Le temps est important, c'est sûr – certaines idées doivent d'abord bien mijoter dans la tête. Et si j'ai suffisamment envie de comprendre quelque chose, je finis par le faire. Un peu de combinatoire, un peu de géométrie, un peu de théorie ergodique *[analyse statistique de systèmes déterministes,* ndlr*]* et beaucoup d'enthousiasme, voilà comment, moi, je fais des maths. Une autre personne vous dira tout autre chose.

Peut-on faire des rapprochements entre l'activité artistique et la recherche mathématique ?

En maths, le choix de la direction est guidé, entre autres, par l'esthétique personnelle. Cela rejoint la démarche artistique. Autre ressemblance, la gestion de la contrainte. Pour modeler de l'argile, le sculpteur doit composer avec la malléabilité de la terre qui impose un geste et une répartition des masses. En mathématiques aussi, on négocie avec les contraintes des objets. Un sculpteur est-il plus libre dans ce qu'il fait qu'un mathématicien ? C'est un bon sujet de débat !

En maths, nous pouvons découper une orange en deux oranges de même taille, mais 2 n'est pas égal à 1 – et nous savons vivre avec ces contradictions apparentes. L'art aussi joue avec la contradiction.

Mais il est plus accessible : chacun peut apprécier une belle sculpture sans passer du temps à la créer. Je suis sûre que le temps viendra où l'on trouvera des musées de mathématiques dans toutes les villes de France.

Ces nombreuses contraintes n'apportent-elles pas de l'intérêt aux mathématiques ?

Il y en a presque trop, et ce n'est pas agréable. Il faut arriver à s'en sortir ! L'intérêt vient du chemin que l'on prend, et des idées qu'on découvre en le parcourant. Les contraintes n'imposent jamais une logique unique. Très différent de la démonstration finale, procédant étape par étape, le processus de découverte est chaotique et incertain. C'est lui qui fait le cœur du métier.

●●● synthèse d'une étude sur les dynamiques de fonctions… complexes ? Bref, inutile de multiplier les illustrations : omniprésents, les nombres complexes sont bien davantage que les rouages commodes d'une technique de calcul.

À la question : « Les objets mathématiques ont-ils une existence préalable ? », l'exemple des nombres complexes permet donc de constater que la réponse peut évoluer avec le développement de nouvelles théories, de nouvelles pratiques, de nouveaux regards. Ce qui pourrait à la fois expliquer pourquoi certains se détournent de la question ontologique des mathématiques – puisque la réponse peut changer – tandis que d'autres demeurent intimement platoniciens : lorsqu'on aura suffisamment apprivoisé le concept, il deviendra si naturel qu'il ne semblera plus une création. Les concepts considérés au départ comme des inventions se révéleront *in fine* des découvertes…

Apprivoiser les concepts avant de pouvoir élucider les mystères qu'ils proposent

Une question, toutefois, demeure : comment les mathématiciens eux-mêmes considèrent-ils leur activité de recherche ? Les réponses varient bien sûr selon les sous-domaines, les cultures, et même les personnalités. Les modélisateurs, par exemple, se doivent de coller aux situations concrètes, et leur démarche se nourrit de ce réel pour inventer des outils mathématiques adaptés. Souvent placées à l'autre bout du spectre, les mathématiques dites « pures » exigent pourtant certains comportements proches : il faut passer un certain temps à apprivoiser les concepts avant de pouvoir élucider les mystères qu'ils proposent. Spécialiste de combinatoire – art de dénombrer les objets satisfaisant certaines propriétés, un domaine que l'on ne peut pas soupçonner de connivence avec les sciences physiques –, Viviane Pons, maîtresse de conférences à l'université Paris-Saclay, explique que dans son approche se succèdent *« des expérimentations manuelles sur des exemples particuliers ou sur tous les éléments d'une classe donnée, qui m'amènent à me forger une intuition voire à obtenir des conjectures »*, puis *« de la programmation qui permet de tester à plus grande échelle »*. La démarche expérimentale tient donc une place de choix dans le rapport entre la chercheuse et son sujet. Finalement, les bons verbes, pour parler de mathématiques, ne sont peut-être pas inventer ou découvrir, mais observer, modéliser, simuler, expérimenter et tester… avant même de démontrer. **ROGER MANSUY**

1. *Récoltes et semailles,* 1986.

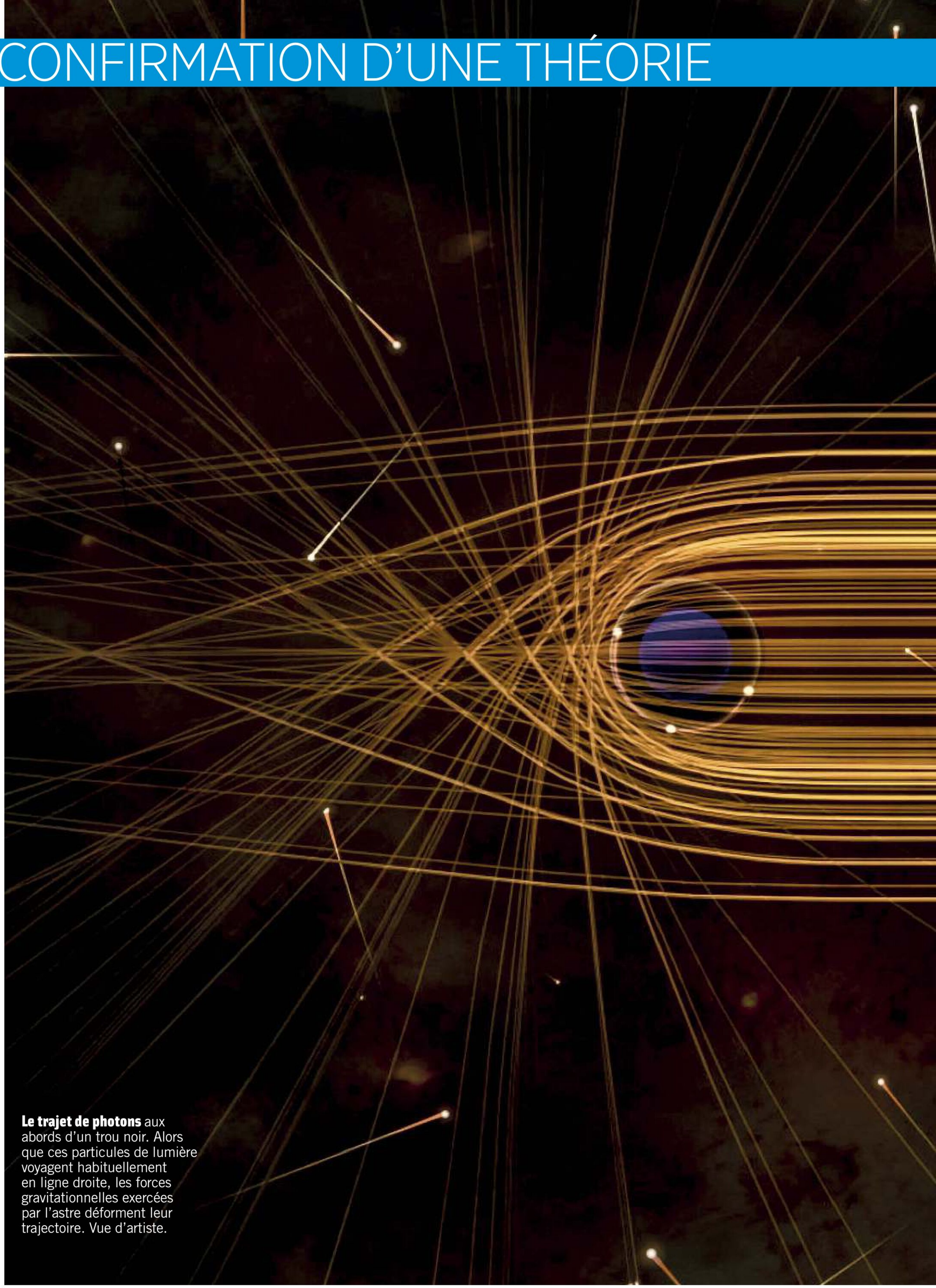
2. Nombres de la forme a + ib avec a, b des nombres réels et i un « nombre » dont le carré est -1.

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #3

La musique d'ascenseur est bénéfique pour le système immunitaire

La musique d'ascenseur – ces mélopées d'ambiance aseptisées et répétitives qui s'apprécient notamment dans les galeries commerciales – stimule la production d'immunoglobuline A (IgA), un anticorps qui joue un rôle central dans l'immunité. Cette découverte revient à deux professeurs en psychologie de l'université de Wilkes (Pennsylvanie), Carl J. Charnetski et Francis X. Brennan Jr., et à James F. Harrison de la société Muzak, spécialiste de ce genre musical. Un premier groupe d'étudiants a été exposé à trente minutes de cette musique avec une présentation de ses effets physiologiques ; un second à une écoute radio de cette musique sans explication ; un troisième à trente minutes de silence, et un quatrième à un simple stimulus son/clic. Résultat : l'IgA du premier groupe a augmenté de 14,1 % et celle du groupe radio de 7,2 %. Le groupe mis au silence a vu son IgA baisser de 9 % et le dernier chuter de 19,7 %. Voilà que la musique d'ambiance adoucit les mœurs… et combat le rhume. **F. F.**

CONFIRMATION D'UNE THÉORIE



Le trajet de photons aux abords d'un trou noir. Alors que ces particules de lumière voyagent habituellement en ligne droite, les forces gravitationnelles exercées par l'astre déforment leur trajectoire. Vue d'artiste.

NICOLLE R. FULLER/NSF/ESO

EINSTEIN LES A PRÉDITS, LIGO LES A SURPRIS

En filigrane dès 1915 dans la relativité générale, trous noirs et ondes gravitationnelles n'ont été observés qu'un siècle plus tard grâce à l'interféromètre Ligo. Cent ans de controverses enflammées et de folles expérimentations.

Un siècle. Il aura fallu un siècle pour confirmer deux des prédictions les plus spectaculaires de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. Le 14 septembre 2015, en effet, les deux interféromètres géants Ligo installés aux États-Unis, à Hanford (État de Washington) et Livingston (Louisiane), ont détecté, de façon irréfutable, des ondes gravitationnelles – des vibrations de l'espace-temps – nées de la fusion de deux trous noirs, astres également en filigrane dans la théorie du génial physicien.

Une aventure qui commence tout juste cent ans auparavant, le 25 novembre 1915, quand Albert Einstein dévoile sa célèbre théorie. À l'inverse du système de Newton, dans lequel les trois dimensions de l'espace et le temps sont séparés, il décrit un espace-temps incurvé à quatre dimensions, dont la courbure s'accroît au voisinage d'astres massifs. Et s'appuie sur des mathématiques si complexes que le physicien américain Ludwik Silberstein – qui se targue de les maîtriser parfaitement – saluera en 1919 un exposé de l'astronome Arthur Eddington par ces mots : *« Félicitations. Vous devez être l'une des trois personnes au monde qui comprennent la relativité générale. »* Devant le silence du Britannique, mondialement connu depuis qu'il a, quelques mois plus tôt, confirmé la déflexion des rayons ●●●

Harry Collins, *Gravity's Kiss. The Detection of Gravitational Waves,* MIT Press, 2017

Alain Riazuelo, *Les Trous noirs. À la poursuite de l'invisible*, De Boeck Supérieur, 2018

Nathalie Deruelle et Jean-Pierre Lasota, *Les Ondes gravitationnelles,* Odile Jacob, 2018

●●● lumineux sous l'effet de la gravité – première prédiction de la relativité –, Silberstein s'impatiente. Eddington répondra enfin, perfide : *« Je me demande qui peut être la troisième personne… »*

S'il n'avait pas été déjà mort à cette date, cela aurait pu être Karl Schwarzschild. Le 22 décembre 1915, ce physicien allemand adresse à Einstein, depuis le front russe, une lettre dans laquelle il propose une solution exacte de l'équation de la relativité générale. Enthousiaste, Einstein présente ce résultat à l'Académie royale des sciences de Prusse. La « solution de Schwarzschild » laisse supposer qu'il pourrait exister des astres si lourds et compacts que tout objet, toute lumière s'approchant à moins d'une certaine distance ne pourrait s'en échapper. Une proposition inaudible pour la plupart des scientifiques. Emporté par la maladie en mai 1916, Schwarzschild ne pourra voir triompher son idée des décennies plus tard.

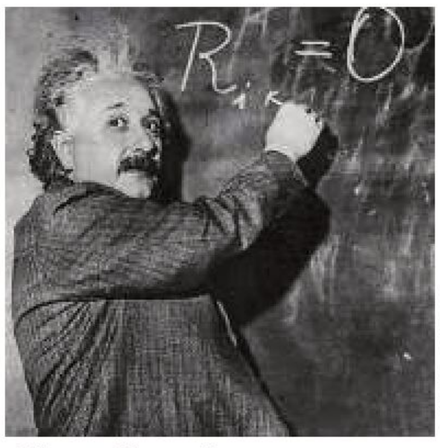
Alors que son article est sous presse, Einstein fait machine arrière…

En juin de cette même année 1916, puis à nouveau en 1918, Einstein fait une autre prédiction tout aussi étonnante : il suggère que le mouvement d'une masse engendre des ondes gravitationnelles, tout comme celui d'une particule chargée crée des ondes électromagnétiques. L'idée le met pourtant mal à l'aise et, les années passant, il se met à douter. Au point qu'il rédige, avec son ex-assistant Nathan Rosen, un manuscrit qu'il expédie en juin 1936 à *Physical Review*, et qui vise à en démontrer l'inexistence… Mais la revue a confié la relecture du texte à l'un des pairs du physicien – procédé encore rare à l'époque –, et celui-ci le rejette. Offensé, Einstein soumet son article au *Journal of the Franklin Institute*, moins réputé. Mais alors que l'article est sous presse, il fait machine arrière et… conforte l'existence des ondes gravitationnelles ! Un revirement lié à l'influence de Howard Robertson, le meilleur spécialiste de la relativité aux États-Unis, qui a persuadé Leopold Infeld, nouvel assistant d'Einstein, de reprendre les calculs de son mentor. À bon escient : ils comportent en effet une erreur… Reconnaissant, Einstein remerciera Robertson dans l'article final. L'aurait-il fait s'il avait su que ce dernier était le pair anonyme de *Physical Review*, détail révélé… en 2005 par le magazine *Physics Today* ?

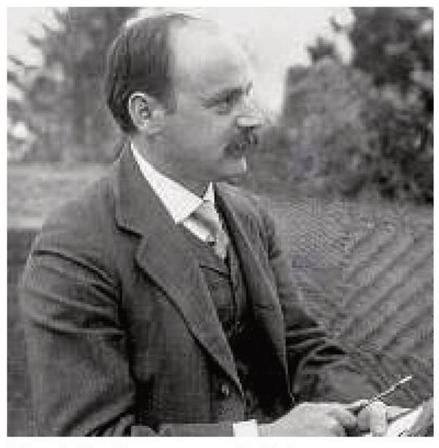
Arthur Eddington, quant à lui, doute de l'existence des ondes gravitationnelles. Dans les *Proceedings of The Royal Society A,* il écrira – avec dédain – en 1922 : *« La seule vitesse de propagation qui les concerne est la "vitesse de la pensée". » « À l'époque, beaucoup se demandaient si elles n'étaient pas un artefact mathématique,* précise Alain Riazuelo, de l'Institut d'astrophysique de Paris. *Pour les trous noirs, le débat a été beaucoup plus rude. Eddington rejetait viscéralement cette idée pour des raisons… philosophiques, tout comme Einstein. Ils avaient du mal à imaginer ce que pourrait être ce type d'objets. »*

Difficile de faire avancer une idée réfutée par de tels savants ! Le jeune physicien Subrahmanyan Chandrasekhar va le découvrir à ses dépens. En 1931, il profite du voyage maritime qui le conduit de son Inde natale à Cambridge, où il va entamer son doctorat, pour réfléchir à l'avenir des étoiles. Et calcule qu'au-delà d'une certaine masse – 1,44 fois celle du Soleil –, une étoile ne peut pas évoluer en naine blanche, astre très dense mais stable. Bien au contraire, elle s'effondre sur elle-même. S'il ne décrit pas l'issue de ce cataclysme, Chandrasekhar, sur les traces de Schwarzschild, s'approche fortement de l'idée de

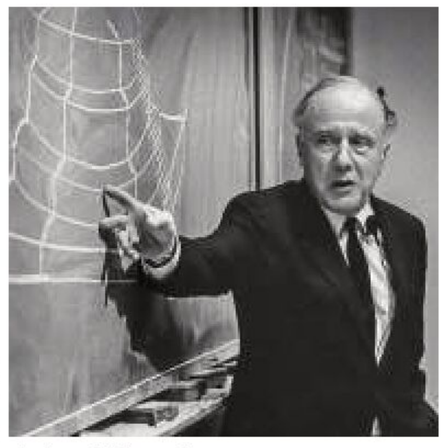
En un siècle, l'aventure de la détection des ondes gravitationnelles et des trous noirs aura mobilisé de nombreux théoriciens et expérimentateurs de génie. Débats passionnés, expériences audacieuses, modélisations se sont succédé sans relâche.

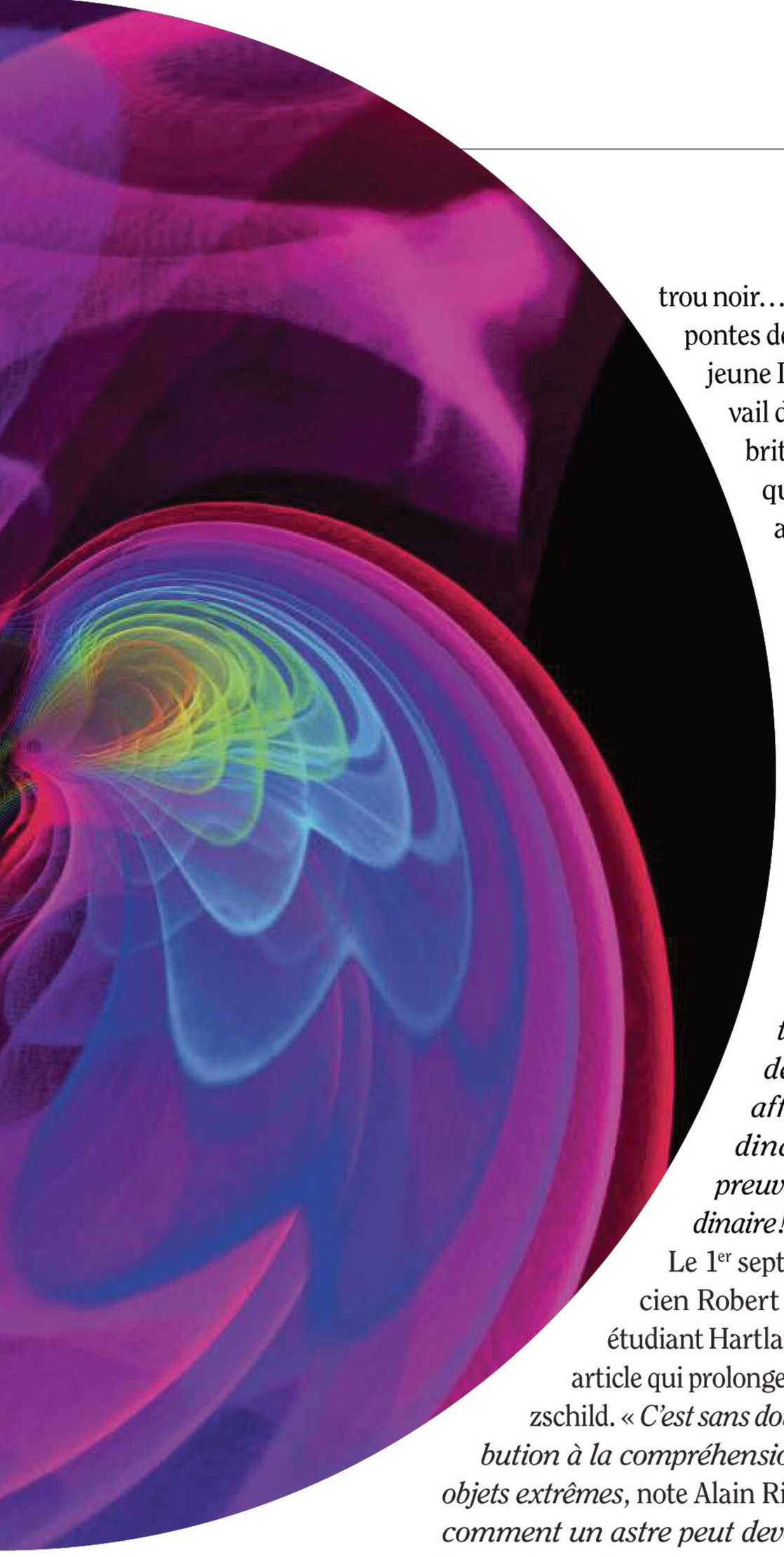

GAMMA-RAPHO
Albert Einstein

COLL. CHRISTOPHEL
Arthur Eddington


DOMAINE PUBLIC
Karl Schwarzschild

SPL/AKG
Subrahmanyan Chandrasekhar


AKG
John Wheeler



Simulation des ondes gravitationnelles émises par la collision de deux trous noirs.

NUMERICAL-RELATIVISTIC SIMULATION: S. OSSOKINE, A. BUONANNO (MAX PLANCK INSTITUTE FOR GRAVITATIONAL PHYSICS). SCIENTIFIC VISUALIZATION: W. BENGER (AIRBORNE HYDRO MAPPING GMBH)

trou noir… Inadmissible pour les pontes de l'époque ! En 1935, le jeune Indien évoque son travail devant la Royal Society britannique. Il ne sait pas qu'Eddington parlera après lui, avec l'intention de le ridiculiser : *« Je pense qu'il existe une loi de la nature qui empêche qu'une étoile se comporte de manière aussi absurde. » « C'est à peine croyable*, s'insurge Alain Riazuelo. *Un physicien de renom qui dit "je pense" pour rejeter une théorie ! Cela démontre que toute affirmation extraordinaire demande une preuve tout aussi extraordinaire ! »*

Le 1er septembre 1939, le physicien Robert Oppenheimer et son étudiant Hartland Snyder publient un article qui prolonge la solution de Schwarzschild. « *C'est sans doute la première contribution à la compréhension de ce que sont ces objets extrêmes*, note Alain Riazuelo. *Ils expliquent comment un astre peut devenir si dense que les forces de pression ne compensent plus la gravitation, laquelle engendre un effondrement et la formation d'un objet si compact que tout ce qui l'approche de trop près est englouti à jamais.* » Un objet si extrême qu'il ne révèle rien sur lui à part trois paramètres, trois « observables » : une masse, une charge électrique et un moment cinétique lié à un mouvement de rotation. C'est ce que l'on appelle le « théorème de calvitie », formulé en 1966 par John Wheeler, l'un des pères des bombes atomiques américaines. Il le résuma ainsi : « *Les trous noirs n'ont pas de cheveux.* » Une manière de dire que la plupart des observables sont masquées par l'horizon des événements. C'est aussi à ce moment-là que Wheeler propose de baptiser « trou noir » ce qui n'était encore que la solution – ou singularité – de Schwarzschild.

Quelques décennies plus tard, en 1965, la détection d'une intense source de rayons X met les scientifiques sur la piste d'un premier trou noir. Baptisée Cygnus X-1, elle est dans un premier temps perçue comme une étoile à neutrons. Mais six ans plus tard, l'Américain Tom Bolton détermine que l'astre en question « pèse » bien trop pour une étoile à neutrons. Cygnus X-1 devient un « candidat trou noir ». Il faut dire qu'entretemps, le Britannique Roger Penrose a décrit ces objets en détail. Et qu'au début des années 1970, le doute n'est plus permis : les observations se multiplient, indirectes, qui ne peuvent être expliquées que par des trous noirs. Dans les années 1990, Reinhard Genzel et Andrea Ghez confirment la présence d'un trou noir supermassif, Sagittarius A*, au centre de notre galaxie. Ce qui leur vaudra la moitié du Nobel de physique 2020 – l'autre moitié revenant à Roger Penrose.

Une autre idée de dispositif germe dans les années 1960 : utiliser la lumière

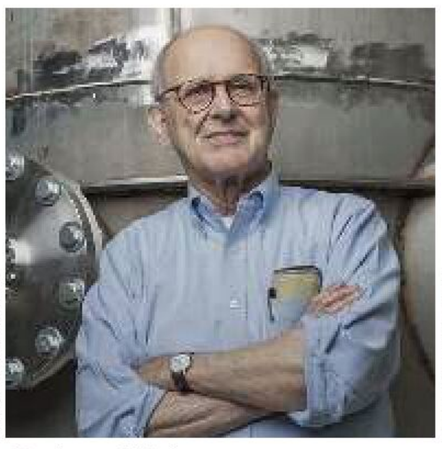
L'existence des ondes gravitationnelles sera tout aussi ardue à faire accepter. Au début des années 1950, elle est encore débattue, et les physiciens qui les admettent s'interrogent sur leur capacité à transporter de l'énergie. La situation se débloque à la suite d'une conférence à Chapel Hill (Caroline du Nord), en 1957. Dans l'assistance se trouve un certain Joseph Weber, co-inventeur du Maser, ancêtre du laser. Il comprend que si les ondes gravitationnelles transportent de l'énergie, celle-ci doit laisser des traces de son passage… pour peu qu'on trouve le détecteur adéquat. Et en 1960, il présente un cylindre d'aluminium – deux mètres de long pour un de diamètre – bardé de capteurs piézoélectriques, dont il calcule que le passage d'une onde devrait le faire résonner au point de modifier sa longueur ●●●

Roger Penrose

SPL/SUCRÉ SALÉ

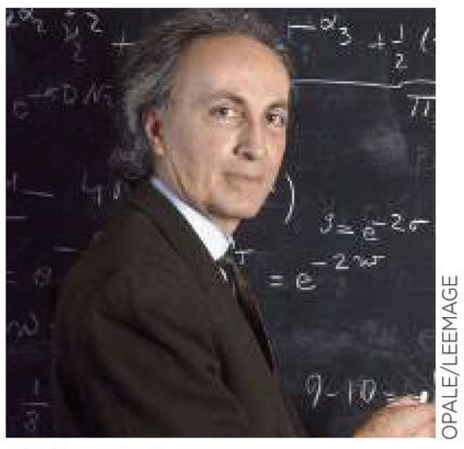
Joseph Weber

SPL/SUCRÉ SALÉ



Rainer Weiss

KEN RICHARDSON



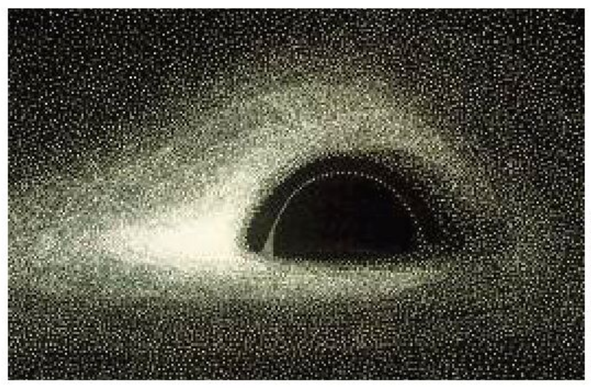
Thibault Damour

OPALE/LEEMAGE

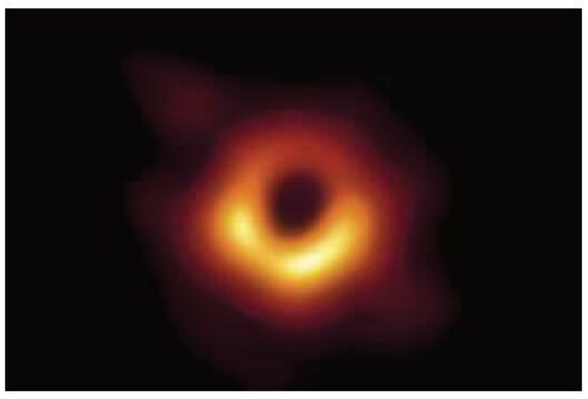
Luc Blanchet

WIKIPEDIA CC

Le modèle et la photo, copies presque conformes



J.P. LUMINET / CNRS



EHT COLLABORATION

En 1979, Jean-Pierre Luminet obtient grâce à ses calculs la première image d'un trou noir, très similaire à la photo de cet objet cosmique dévoilée en 2019.

En 1979, c'est un Français, Jean-Pierre Luminet, qui publie la première image d'un trou noir. *« D'abord dans* La Recherche, *puis dans* Astronomy & Astrophysics, raconte le chercheur du Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *Cette modélisation était le fruit de mes calculs de l'année 1978 avec un modèle théorique. »* Quarante ans avant la première photo dévoilée le 10 avril 2019 par l'Event Horizon Telescope (EHT), un réseau de radiotélescopes mondial. *« Ce qui est extraordinaire, c'est que le seul écart avec l'image obtenue par l'EHT est un angle de vue différent. »* Sur la détection des ondes gravitationnelles, Jean-Pierre Luminet concède sa surprise. *« C'est arrivé plus vite que je ne l'attendais. Mes collègues insistaient beaucoup sur le fait qu'ils devraient obtenir des mesures dont la précision nominale serait de 10^{-19} ou 10^{-20}. Mais en 2014, lors d'un congrès en Belgique sur le génial Georges Lemaître, le père de la théorie du Big Bang, j'ai discuté avec Bernard Schutz, un protagoniste du projet Ligo. Il m'a dit que cette précision serait atteinte dès 2015. Je n'y croyais pas. Mais ils y sont arrivés ! Et depuis, on a vu vingt événements, des fusions trou noir/trou noir, étoile à neutrons/trou noir et étoile à neutrons/étoile à neutrons. Nous avons désormais à notre disposition une véritable astronomie gravitationnelle et nous attendons avec impatience l'interféromètre spatial ! »*

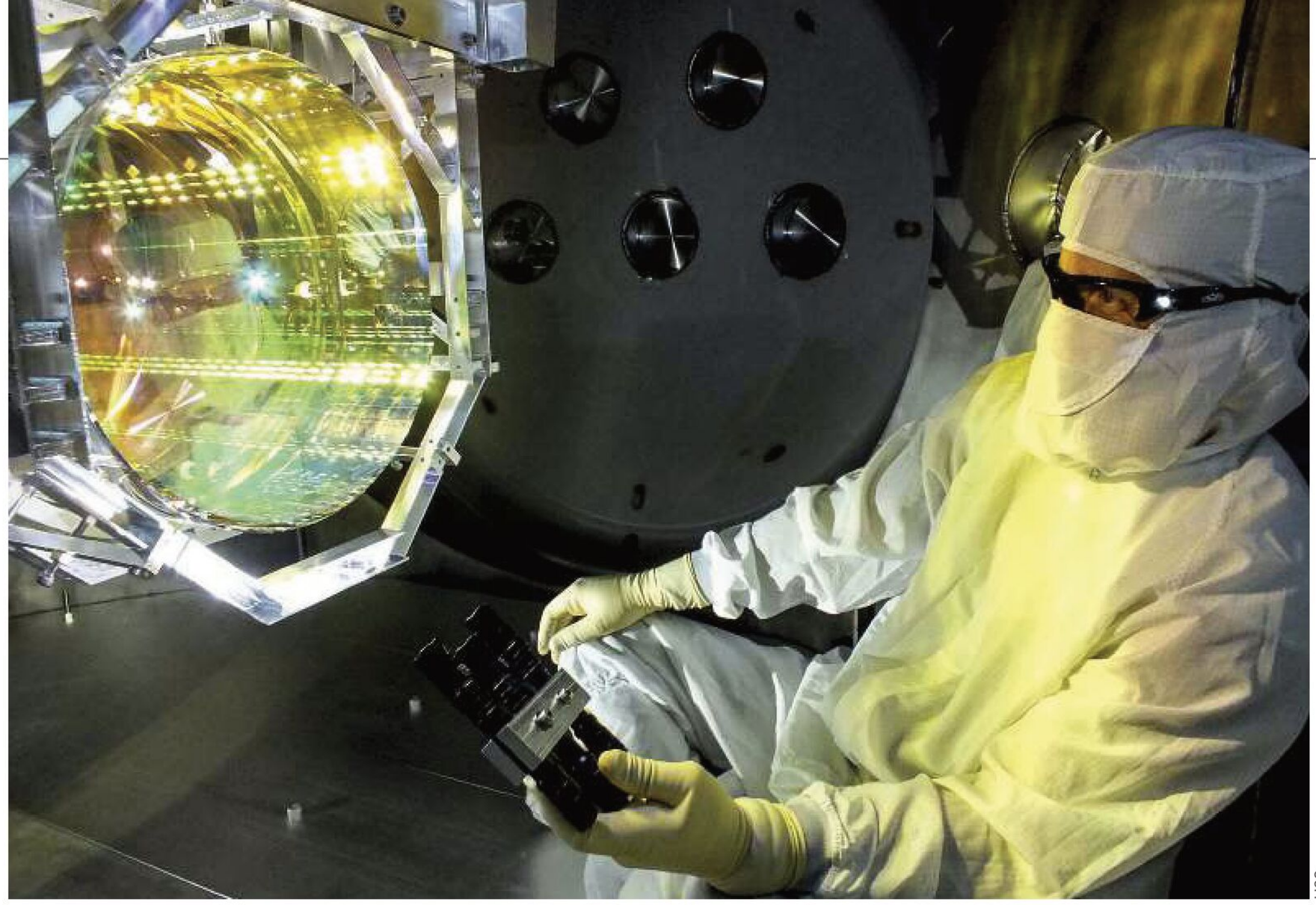
●●● d'environ 10^{-16} mètre. En 1969, il annonce avoir réussi une détection. Plusieurs groupes tentent de reproduire son expérience. En vain.
Weber s'entêtera jusqu'à sa mort, en 2000. *« Sans sa folle idée, on n'aurait jamais cherché à observer d'ondes gravitationnelles sur Terre »*, affirme Harry Collins, sociologue britannique qui a étudié pendant plus de quarante ans les chasseurs d'ondes gravitationnelles. Pour isoler son expérience du bruit de fond, Weber a imaginé des astuces qui vont nourrir la réflexion de nombreux physiciens dans les années 1970.
Dans les années 1960 germe une autre idée de dispositif permettant de détecter le déplacement de masses induit par les ondes gravitationnelles : il s'agit d'utiliser la lumière. Une idée que Weber serait le premier à avoir évoquée, dès 1964. Mais qui se concrétisera avec l'entrée en scène de l'Américain Rainer Weiss, le futur concepteur de Ligo : il construit en 1975 un interféromètre de Michelson dont les « bras » mesurent neuf mètres de long. Ce dispositif, inventé par Albert Michelson et Edward Morley au début des années 1880, est un *must* des travaux pratiques d'étudiants en optique : un pinceau de lumière éclaire une lame de verre orientée à 45 degrés. Une partie de la lumière traverse la lame séparatrice et poursuit en ligne droite, tandis que l'autre se réfléchit à 90 degrés du premier. Puis chacun de ces faisceaux rebondit sur un miroir et revient vers la séparatrice. En sortie de l'instrument, la différence de longueur entre les deux bras module l'intensité du signal d'un détecteur. Si ceux-ci ont exactement la même longueur et que les miroirs sont isolés, le passage d'une onde provoquera une différence de longueur entre les bras qui pourra être détectée. Mais un « Michelson » de l'époque mesure des déplacements relatifs de 10^{-10}. Or, pour traquer les ondes gravitationnelles, il faudra gagner en précision… de l'ordre d'un milliard de fois ! Le détecteur sera donc nécessairement géant.

Un catalogue numérique des formes possibles d'ondes

Quatre décennies de développements théoriques et techniques seront nécessaires pour y parvenir. Avec une certitude : il est indispensable d'utiliser deux instruments éloignés pour valider une observation, et plus encore pour tenter d'en localiser la source. À condition d'abord d'isoler les infimes signaux gravitationnels de l'océan de bruit – sismique, électromagnétique, etc. – qui entoure les interféromètres. *« Le passage d'un camion à 500 kilomètres provoque une vibration des miroirs plus importante que celui d'une onde gravitationnelle »*, rappelle Julien Grain, de l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay.
Dans une telle situation, plus on en connaît sur le signal, et moins son extraction est complexe. Les théoriciens, et en particulier les Français Thibault Damour et Luc Blanchet, vont fortement contribuer à cette meilleure connaissance, en établissant des modèles décrivant le rapprochement et la fusion d'étoiles à neutrons et de trous noirs. La communauté, aidée de supercalculateurs, constituera ensuite un catalogue numérique de « calques » des formes possibles d'ondes. *« À chaque calque correspond une source et donc ses caractéristiques*, résume Julien Grain. *Ce sont donc les théoriciens qui ont expliqué ce qu'il fallait chercher dans les données. »*

OPALE/LEEMAGE

« Eddington, tout comme Einstein, rejetait l'idée de trous noirs pour des raisons… philosophiques. Ils avaient du mal à imaginer ce que pourrait être ce type d'objets »
Alain Riazuelo, Institut d'astrophysique de Paris



LIGO

Inspection de l'un des miroirs optiques de l'interféromètre Ligo, aux États-Unis. La surface du miroir doit être presque parfaite, de manière à ne pas perdre plus de 0,0001 % de la lumière quand celle-ci se réfléchit dessus.

« La première génération de détecteurs n'était pas assez sensible. Mais elle a permis de comprendre comment progresser… et déclenché les financements pour la suite », se réjouit Frédérique Marion, du laboratoire d'Annecy de physique des particules, membre de la collaboration Virgo, l'observatoire européen installé près de Pise. Améliorés, les deux Ligo et le Virgo observent des signaux dans une gamme de fréquences qui correspond aux ondes émises dans les derniers instants précédant la fusion d'astres compacts de quelques dizaines de masses solaires, puis pendant la courte période de retour à l'équilibre de l'objet qui s'est formé.

Dans les années 2030, des satellites formant des bras de 2,5 millions de kilomètres de long

Le 14 septembre 2015, quand l'alarme de détection de signal sonne dans les deux Ligo distants de 3000 kilomètres, Virgo est encore en travaux. *« C'était un peu frustrant,* concède Frédérique Marion. *Mais nous ne sommes pas restés au bord de la route. Nos deux équipes collaboraient depuis 2007. Nous avons donc tous participé à l'analyse des données et à la rédaction de l'article. »* Après six mois de vérifications, l'espoir est devenu réalité : il s'agissait bien de la première détection d'ondes gravitationnelles et de la première observation directe des effets de la fusion de deux trous noirs sur l'espace-temps. La confirmation de leur existence s'est vue renforcée, quatre ans plus tard, par la publication de la première photographie d'un trou noir supermassif, M87*, équivalant à 6,5 milliards de soleils. *« L'observation de trous noirs supermassifs permettra de vérifier si la relativité générale décrit correctement ces régions d'espace-temps très courbes, ou si un écart est observé »*, se réjouit Julien Grain. Des observations facilitées par d'autres instruments en cours de construction. *« Le détecteur Kagra est en train d'être qualifié au Japon, et le projet de Ligo en Inde avance bien. De plus, nous espérons gagner un facteur deux en sensibilité sur les Ligo et Virgo, ce qui multipliera par huit le volume d'Univers visible et donc le nombre d'événements susceptibles d'être observés »*, ajoute Frédérique Marion.

Dans les années 2030, l'Europe doit mettre en orbite l'interféromètre spatial Lisa – trois satellites reliés par faisceau laser formant des bras de 2,5 millions de kilomètres de long chacun ! Il devrait capter les signaux liés à la fin de la coalescence de trous noirs hypermassifs, mais aussi le rapprochement d'astres plus légers, très en amont de leur fusion, pour alerter les détecteurs terrestres dix ou vingt ans à l'avance ! Des instruments dont il semble de plus en plus évident qu'ils seront complétés, dans les prochaines décennies, par le télescope Einstein : un interféromètre de troisième génération doté de deux – ou trois – bras de 10 kilomètres, enfoui à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

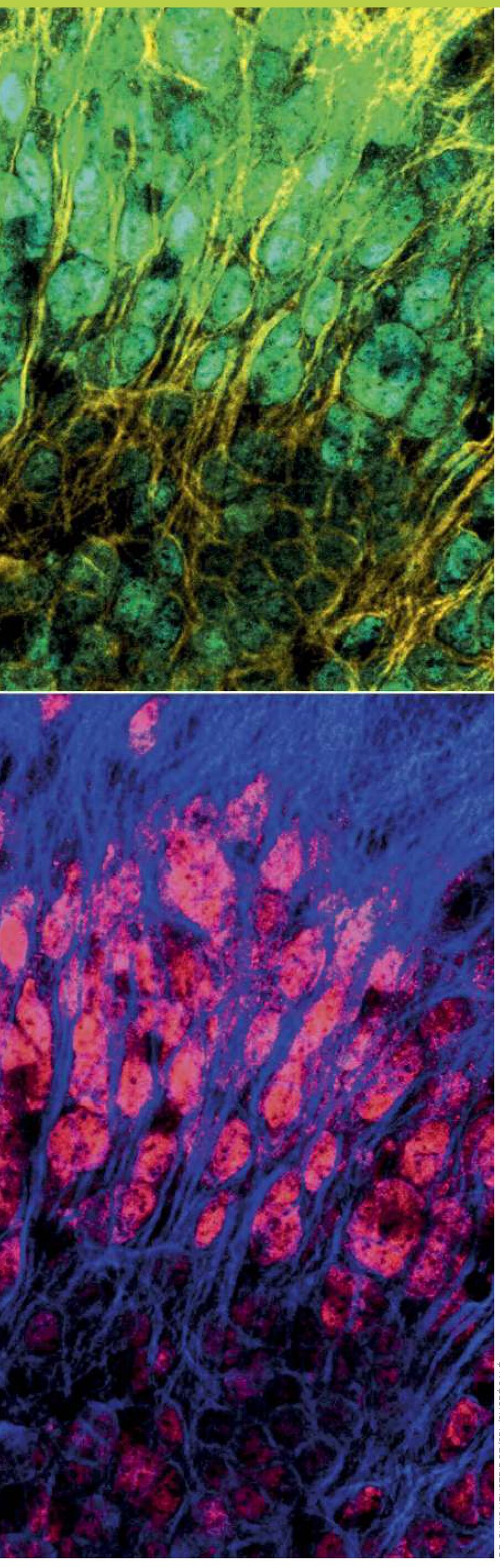
Loin d'être la fin de l'aventure, la détection de 2015 a aussi ouvert une nouvelle ère, celle de l'astronomie multi-messager, ou détection simultanée de différents rayonnements et ondes. C'est ainsi qu'en août 2017, la détection des ondes gravitationnelles émises par la fusion de deux étoiles à neutrons a permis de pointer vers cette région du ciel une armada de télescopes explorant la lumière visible, les ondes radio et le rayonnement gamma. Une première combinaison de nos « yeux » électromagnétiques et gravitationnels qui présage une avalanche de découvertes dans les décennies à venir. **DENIS DELBECQ**

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #4

Quand les scientifiques français résolvent l'énigme du spaghetti

Pourquoi un spaghetti cru ne se brise-t-il pas en deux morceaux égaux ? La question avait été soulevée par l'éminent physicien américain Richard Feynman, nobélisé en 1965, qui passa plusieurs heures à briser des spaghettis pour ne jamais récupérer moins de trois morceaux. La réponse est venue de deux chercheurs français du laboratoire de modélisation en mécanique de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Basile Audoly et Sébastien Neukirch. Pour bien saisir la fragmentation du spaghetti, une caméra à 1000 images/seconde a été utilisée. Si la pâte se brise tout d'abord en deux, des ondes élastiques se propagent dans la longueur des morceaux, comme des vagues, augmentant leur courbure jusqu'à dépasser la limite de courbure, déclenchant de nouvelles ruptures. Cette explication a été saluée par l'Ig Nobel de physique en 2006. **F. F.**

Tissus cérébraux
vus en microscopie de fluorescence, mis en évidence grâce à différents colorants. Le cerveau comporte 85 millions de neurones pour 100 millions de cellules gliales, dont le rôle a commencé à être précisé il y a seulement une dizaine d'années.



DR. CHRIS HENSTRIDGE/SPL/SUCRÉ SALÉ

ON A DISSÉQUÉ LE SIÈGE DE LA PENSÉE !

À la fin du XIXe siècle, un biologiste à l'attention aiguisée par la pratique du dessin affirme l'existence des neurones, unités de base du système nerveux. Il ouvre ainsi la voie au fantastique développement des neurosciences.

« *Je ne crois que ce que je vois* », aurait affirmé saint Thomas. Mais encore faut-il comprendre ce qu'on voit, aurait pu ajouter Santiago Ramón y Cajal, dont les observations et les dessins ont permis à la fin du XIXe siècle d'établir que le cerveau, le siège de la pensée, n'est pas un organe complètement différent des autres. L'histoire attribue ainsi au neurologue la paternité de la théorie du neurone, selon laquelle celui-ci est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du système nerveux. « *Fondamentalement, cette théorie résout une question d'anatomie* », résume Denis Forest, philosophe des sciences à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. Le cerveau ne s'affranchit pas de l'organisation biologique basale.

Mais celui sans qui on n'aurait rien vu, c'est Camillo Golgi, médecin italien né en 1843. « *L'histoire dit qu'il utilisait du bichromate de potassium comme fixateur pour ses coupes de cerveau et qu'il en aurait oublié un lot, sur lequel, par mégarde, du nitrate d'argent aurait précipité* », raconte Jean-Gaël Barbara, historien et épistémologue des neurosciences au CNRS. Un oubli qui a constitué une avancée cruciale. Car il a provoqué la « réaction noire », le phénomène chimique qui a permis, pour la première fois, de colorer certaines cellules du cerveau dans leur totalité.

À l'époque, cela fait près de deux siècles que l'on peut étudier, grâce au microscope, les tissus bio- ●●●

Documentaire sur Santiago Ramón y Cajal (en espagnol) http://sciav.fr/cajal

Matthew Cobb, *Une brève histoire du cerveau*, Dunod, 2021

Jean-Gaël Barbara, *La Naissance du neurone,* Vrin, 2010

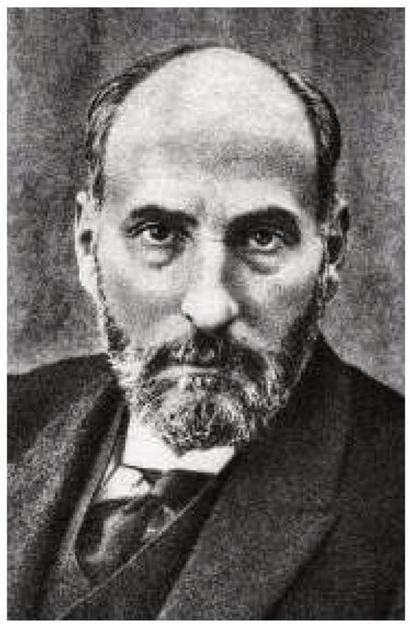
Yves Agid, Pierre Magistretti, *L'Homme glial*, Odile Jacob, 2018

●●● logiques. On les coupe, on les teinte avec différentes solutions afin de faire ressortir telle ou telle composante. L'association éosine-hématoxyline, par exemple, colore l'intérieur des cellules en rose orangé, alors que le noyau apparaît sombre. Cette histologie naissante a permis à deux scientifiques allemands, Matthias Jakob Schleiden et Theodor Schwann, d'énoncer en 1838 la théorie cellulaire : tous les organismes sont faits de petites unités, les cellules.

Tous ? Pas si sûr… Car pour que l'organisation d'un tissu biologique se révèle à l'observateur, seules certaines structures doivent fixer la couleur. C'est le contraste au sein du tissu qui rend le marquage lisible. Or les cellules du cerveau, et des tissus nerveux en général, résistent encore aux colorations. Ces dernières teintent de la même façon les corps cellulaires, qui contiennent le noyau du neurone, et les fibres, qui se projettent d'une région à l'autre. Empêchant ainsi toute lecture de l'organisation des tissus nerveux. C'est sur ce point que la coloration de Golgi est décisive.

Comment fonctionne-t-elle ? Le nitrate d'argent précipite au contact du bichromate de potassium, formant du chromate d'argent dans certains neurones. « *C'est un précipité aléatoire*, explique Jean-Gaël Barbara. *Lorsque la réaction a lieu dans un neurone, on observe une belle coloration de ce neurone et de ses contours.* » Seuls 1 à 5 % des neurones sont ainsi marqués, sans que l'on sache vraiment l'expliquer. Comme les cellules colorées ne se chevauchent pas, on peut analyser plus finement les contours de chaque neurone.

Mais voir ne suffit pas toujours à comprendre. Ainsi, grâce à cette technique, Golgi publie une série d'observations qui soutiennent la représentation dominante à l'époque : le cerveau est constitué d'un réseau continu de cellules et de fibres, comme un ensemble de canaux dans lesquels la pensée se forme et circule.



SPL/SUCRÉ SALÉ

L'histologiste espagnol Santiago Ramón y Cajal, souvent appelé le « père » du neurone.

Page de droite : l'un des milliers de dessins de Cajal, représentant ici le cervelet et sa structure. Avant d'entreprendre des études de médecine, le biologiste se destinait à une carrière artistique, ce dont témoigne sa maîtrise de la ligne. Il concevait le dessin comme une discipline permettant de focaliser son attention sur le moindre détail des phénomènes observés.

C'est la théorie réticulaire, énoncée par l'anatomiste allemand Joseph von Gerlach en 1871.

La technique de Golgi, délicate à maîtriser, est lente à se diffuser parmi les savants d'Europe. Elle n'arrive dans le laboratoire de Santiago Ramón y Cajal qu'en 1887. Professeur d'histologie à l'université de Barcelone, l'Espagnol augmente l'épaisseur des coupes de cerveau, adapte le protocole mis au point par Golgi et, à force d'application, développe une maîtrise inégalée de la réaction noire. Comme bien souvent dans l'histoire des sciences, le génie se manifeste au prix d'un travail colossal.

De ses heures d'observations microscopiques, il produit des milliers de dessins. « *Cajal travaillait beaucoup, vérifiant, reproduisant plusieurs fois et soumettant ses coupes à un examen attentif et rigoureux* », détaille Yves Agid, professeur émérite de neurologie et de biologie cellulaire. Ce labeur produit des conclusions et des hypothèses révolutionnaires. L'ambition de Cajal ? « *Décrire le support matériel de la pensée et de la volonté* », avouera-t-il dans ses mémoires.

Des cellules aux longs prolongements arborés semblant ne jamais se rencontrer

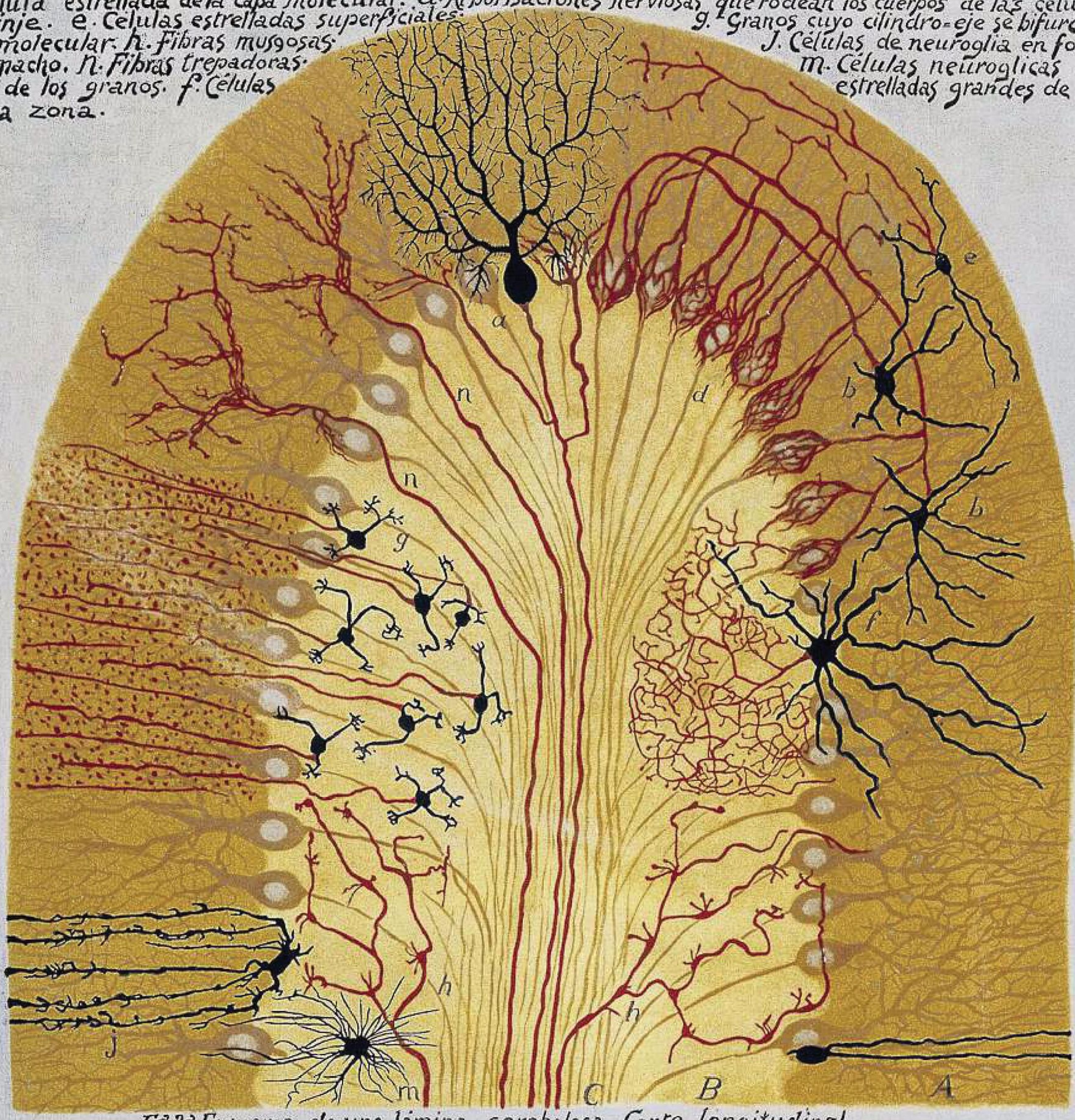
De sa plume trempée dans l'encre de Chine, Santiago Ramón y Cajal décrit des cellules aux longs prolongements arborés semblant ne jamais se rencontrer. Dès 1888, il en déduit que le cerveau ne constitue pas une exception à la théorie cellulaire. Ces cellules, unités fonctionnelles, ne forment pas un réseau continu, mais des circuits, grâce à leurs extrémités proches les unes des autres. Ce n'est pourtant pas à l'Espagnol que l'on doit, en 1891, le terme « neurone » pour les désigner, mais à l'un de ses plus importants soutiens, l'Allemand Heinrich Wilhelm Gottfried von Waldeyer-Hartz, qui pèse de son prestige sur le monde savant – il a aussi nommé le chromosome – et vulgarise la théorie de Cajal. ●●●

Règlement de comptes à Stockholm

Quand Camillo Golgi et Santiago Ramón y Cajal reçoivent – conjointement – le prix Nobel de médecine, en 1906, la controverse entre la théorie réticulaire et la théorie du neurone perdure. Certes, le camp du neurone domine, grâce à la qualité des dessins et des observations de Cajal. Mais cela ne suffit pas à convaincre Golgi, fervent supporteur de la conception réticulariste. L'Italien n'hésite d'ailleurs pas à utiliser son temps de parole pour décrire les failles de la théorie soutenue par son confrère espagnol. Il démonte ainsi le concept qu'il a lui-même contribué à découvrir. « *Cajal et Golgi ne se sont même pas adressé la parole à Stockholm* », s'amuse le neurologue Yves Agid.

« *La théorie réticulaire ne sera complètement abandonnée qu'avec les observations en microscopie électronique* », explique Jean-Gaël Barbara. Les images de Sanford Palay et celles d'E. G. Gray, publiées en 1959, révèlent ainsi la nature finie des extrémités dendritiques ainsi que les synapses, larges de seulement 200 Å, soit un millionième de millimètre. Elles constituent l'ultime preuve par l'image de la discontinuité des cellules nerveuses. Néanmoins, l'histoire des neurosciences ne reléguera pas complètement la théorie de Golgi aux oubliettes. La découverte des portes de communication, dites *gap junctions,* reliant les astrocytes entre eux, et leur couplage par un courant de calcium peut faire penser à un système réticulaire. La théorie apparemment vaincue il y a 100 ans peut donc coexister avec celle du neurone. Une histoire qui finit bien, ce qui n'aurait sans doute pas déplu à Cajal. Lequel reconnaissait dans ses mémoires que « *c'est une triste vérité que presque personne ne peut s'extraire totalement de la tradition et de l'esprit de son époque* ».

Fª 1ª Esquema de la estructura del cerebelo = Corte transversal de una laminilla cerebelosa.
A. Zona molecular. B. Capa de los granos. C. Substancia blanca. a. Vista de plano de una célula de Purkinje. b. Célula estrellada de la capa molecular. d. Arborisaciones nerviosas que rodean los cuerpos de las células de Purkinje. e. Celulas estrelladas superficiales. g. Granos cuyo cilindro-eje se bifurca en la capa molecular. h. Fibras musgosas. j. Células de neuroglia en forma de penacho. n. Fibras trepadoras. m. Células neuroglicas de la capa de los granos. f. Células estrelladas grandes de esta misma zona.



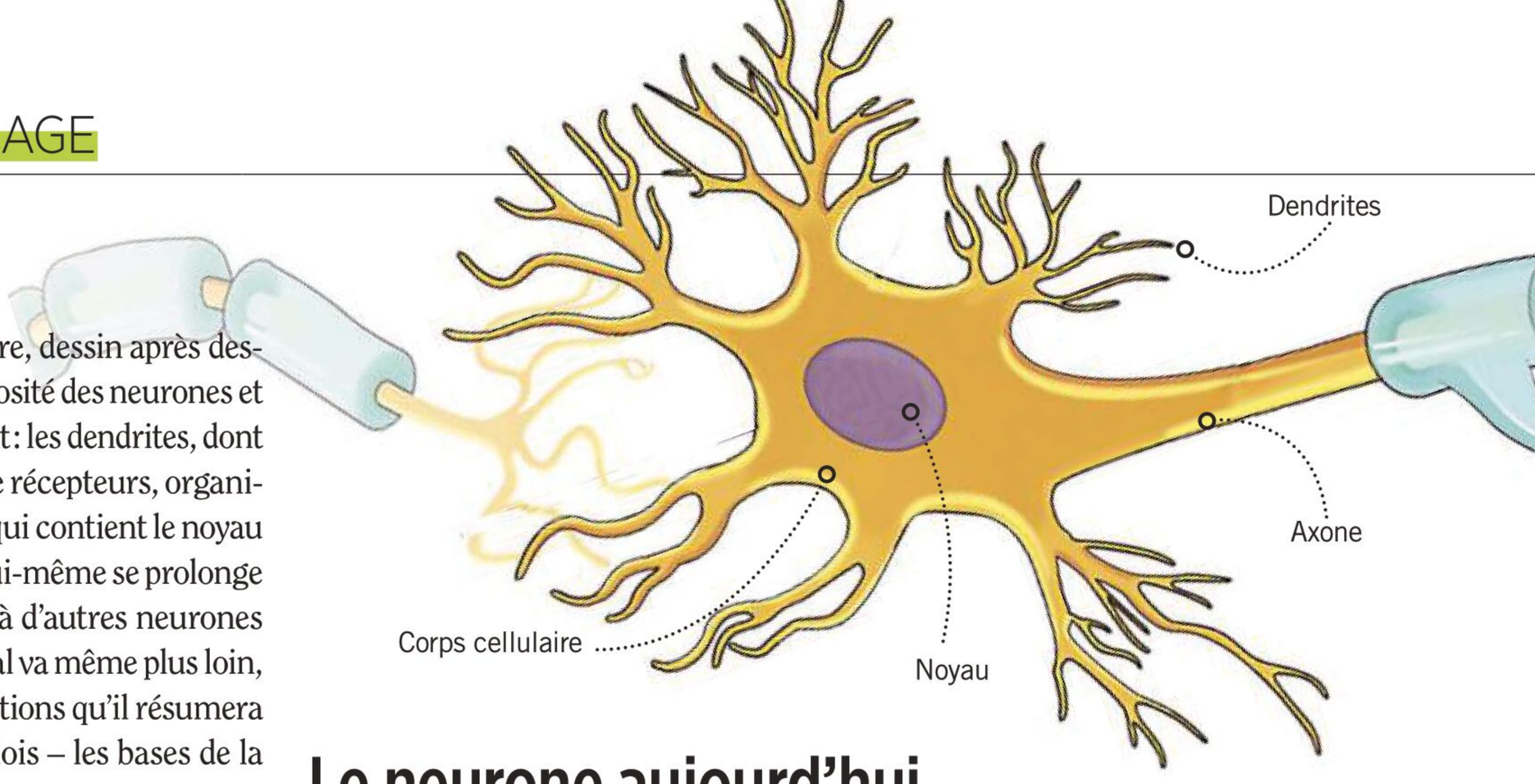
Fª 2ª Esquema de una lámina cerebelosa = Corte longitudinal.
A. Capa molecular. B. Capa de los granos. C. Substancia blanca. a. Cilindro-eje ascendente de un grano. b. Bifurcacion de este cilindro-eje y su continuación con una fibra paralela. d. Celula de Purkinje vista de perfil. e. Estremo de las fibras paralelas. f. Cilindro-eje de una celula de Purkinje.

S. R. Cajal - delineó.

R. Padró - pinx.

AISA/LEEMAGE/BRIDGEMAN

UNIVERSIDAD CENTRAL · FACULTAD DE MEDICINA
CENTRO Poligráfico ESCOLAR



Le neurone aujourd'hui

●●● Tout au long de sa carrière, dessin après dessin, Cajal représentera avec virtuosité des neurones et les trois parties qui les composent : les dendrites, dont on connaît aujourd'hui le rôle de récepteurs, organisées autour du corps cellulaire, qui contient le noyau et la machinerie cellulaire, qui lui-même se prolonge dans un axone qui le connecte à d'autres neurones ou d'autres types de cellules. Cajal va même plus loin, accumulant une mine d'observations qu'il résumera dans ses mémoires par quatre lois – les bases de la théorie neuronale :

• Toutes les terminaisons des fibres du cerveau aboutissent dans la matière grise, la couche la plus externe du cerveau. Elles ne forment pas un réseau diffus et continu, contrairement à ce que soutiennent Golgi et Gerlach. Leurs arborisations sont libres, non pas attachées au neurone contigu.

• Ces ramifications sont intimement liées aux corps cellulaires et aux dendrites des cellules nerveuses.

• Cette proximité implique que les dendrites et les corps cellulaires participent à la conduction de l'information en recevant le signal avant de le transmettre.

• L'absence de continuité entre les cellules suggère que le signal nerveux se transmet par des contacts ressemblant à ceux qui transmettent l'électricité entre deux conducteurs.

Ainsi, non seulement Cajal impose-t-il une conception cellulaire du cerveau, mais il pressent le sens de conduction de l'influx nerveux (des dendrites aux axones). Il suppose également que cette discontinuité n'empêche pas la transmission du signal nerveux puisqu'elle se fait par contact.

« En définissant une unité fonctionnelle dans le cerveau, la théorie du neurone pose un problème : comment communiquent ces cellules ? De cette découverte découlent les concepts de synapse puis de neurotransmetteur », précise Denis Forest. Le mot synapse apparaît en 1887, quand le physiologiste anglais Charles Sherrington propose le terme pour qualifier ce point de liaison entre deux neurones, ou un neurone et une cellule d'un autre type.

Aidé d'un simple microscope, Cajal avait parfaitement décrit la structure du neurone tel qu'il est observé aujourd'hui avec des instruments bien plus puissants.

Les observations de Cajal sont également importantes pour comprendre la formation du cerveau. *« Il travaille sur des tissus embryonnaires, car la coloration de Golgi y est plus efficace »*, raconte Jean-Gaël Barbara. Il observe les cônes de croissance : des extensions dynamiques des axones cherchant une cible. Au fil de ses dessins, il décrit différentes phases de la maturation d'un neurone, migrant au cours du développement du cerveau, et une multitude de cellules nerveuses différentes, dans le cerveau, le cervelet ou le système nerveux périphérique.

À force d'être sollicité, un circuit neuronal augmente la quantité de ses connexions

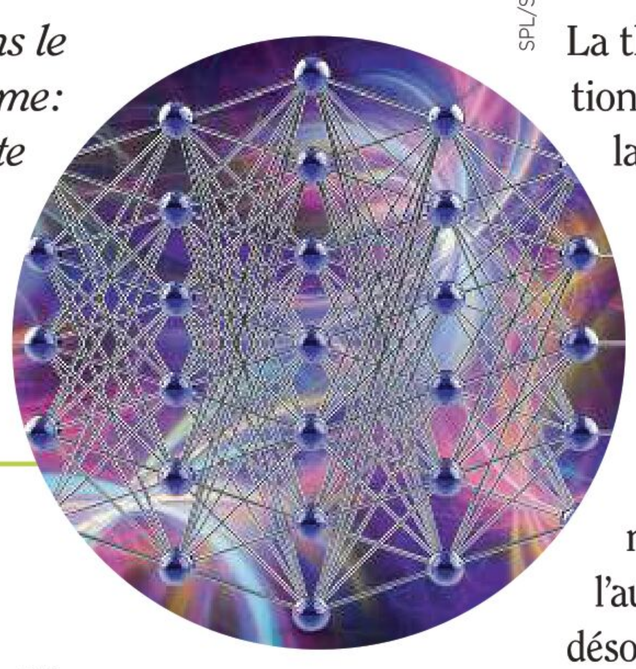
La théorie du neurone et l'ensemble des supputations de Cajal, dont très peu ont été démenties par la suite, constituent les bases sur lesquelles les neurosciences vont se développer au cours du XXe siècle. Le fonctionnement de la synapse sera résolu dans les années 1940 avec les travaux du biophysicien allemand émigré en Angleterre Bernard Katz. Celui-ci établit comment l'influx électrique devient chimique avec la libération de neurotransmetteurs pour passer d'un neurone à l'autre ou d'un neurone au muscle : on connaît donc désormais le mode de propagation de l'influx nerveux de cellule en cellule.

Quelques années plus tard, avec l'invention des premiers ordinateurs, l'idée que le cerveau fonctionne comme un ordinateur de neurones s'impose peu à peu dans la communauté scientifique. L'hypothèse majoritaire actuelle suppose que nos fonctions mentales – notre pensée, nos émotions… – sont strictement portées par les neurones et leur organisation en circuits. *« C'est le cas notamment des modèles*

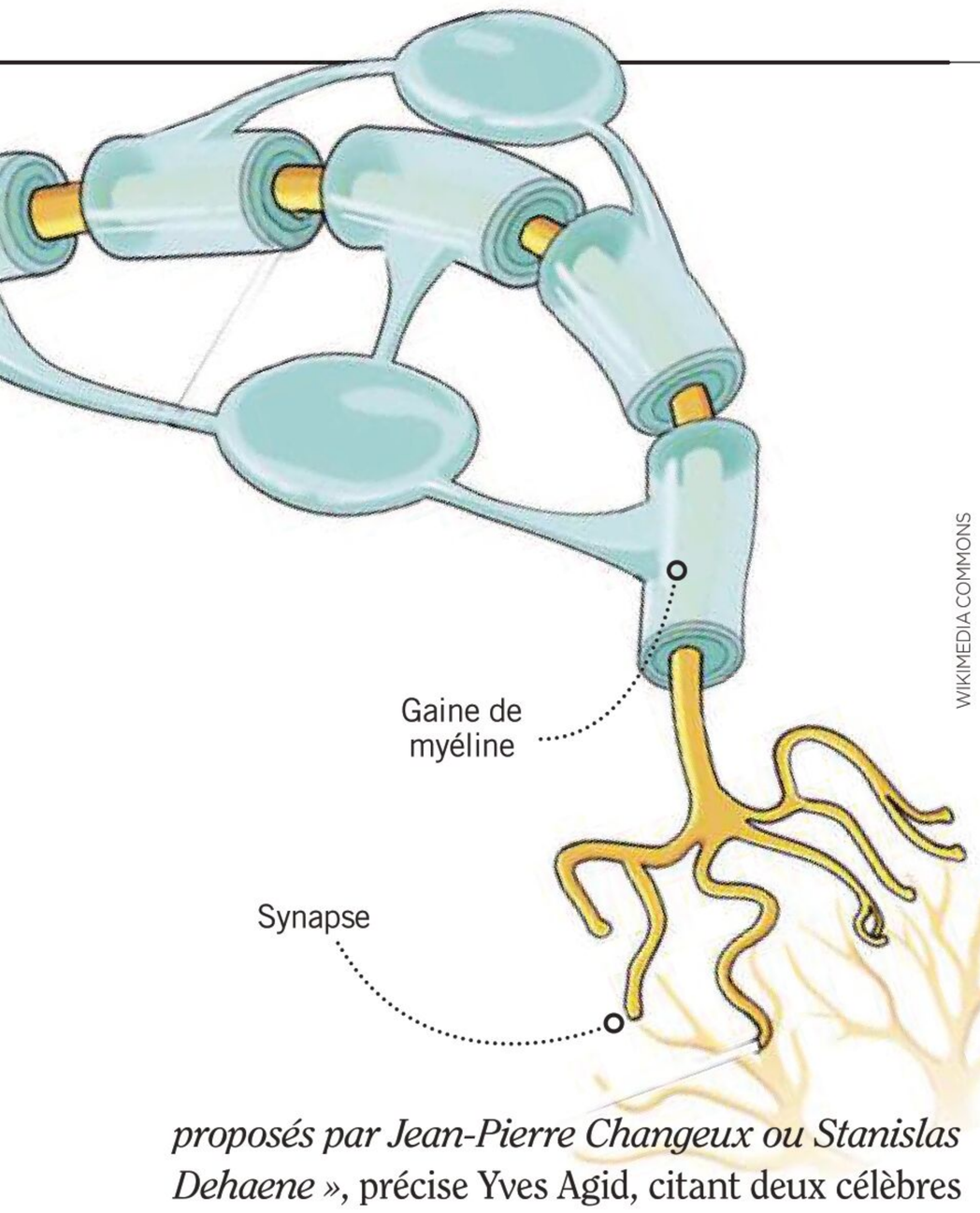
Ils inspirent le *machine learning*

Organisés en réseau, capables de pondérer l'information qu'ils véhiculent selon son intensité, appliquant un système « du tout ou rien » imposant que le signal atteigne un seuil donné pour être propagé, ce qui améliore l'efficacité de sa transmission en évitant le bruit… Les neurones intéressent l'algorithmique avant même l'invention de l'informatique. Dès 1943, le neurophysiologiste Warren McCulloch et le logicien Walter Pitts imaginent un système computationnel à partir de neurones. Mais il aura fallu le XXIe siècle pour que la puissance de calcul disponible assure le déploiement du concept. Ces réseaux de neurones artificiels soutiennent désormais la plupart des approches de *machine learning*, notamment celles qui visent à… modéliser le fonctionnement du cerveau. Un circuit vertueux.

SPL/SUCRÉ SALÉ



Les réseaux de neurones artificiels (ici représentation créée par ordinateur) sont conçus à l'image des neurones biologiques.



WIKIMEDIA COMMONS

proposés par Jean-Pierre Changeux ou Stanislas Dehaene », précise Yves Agid, citant deux célèbres neuroscientifiques français.

Pour expliquer l'apprentissage, par exemple, les neurosciences utilisent le concept de renforcement synaptique. Comme Cajal l'avait supputé, si les neurones ne bougent pas, ils sont pourtant en mouvement. Les extrémités des axones et des dendrites peuvent disparaître ou croître selon les besoins du circuit – ce que les spécialistes appellent la plasticité synaptique. Quand on apprend un raisonnement, un geste, une langue, un circuit neuronal donné s'active. À force d'être sollicité, il va se renforcer: il augmentera la quantité de ses connexions.

Le physiologiste britannique Horace Barlow expliquait, en 1972, que « *les neurones actifs dans les circuits supérieurs [des ensembles de neurones qui superviseraient l'activité mentale,* ndlr*] forment de manière simple et directe notre perception* ». Il suffirait donc de décrire ces circuits pour en élucider la fonction. À partir de 2005, les projets de « connectomes » mobilisent la communauté neuroscientifique. En décrivant le plus précisément possible les connexions entre les neurones, il sera possible de percer le code mystérieux permettant au cerveau de penser, espère-t-on. Comme l'écrit l'historien Matthew Cobb, « *l'idée fondatrice de l'étude des connectomes est une version modernisée de la doctrine neuronale de Cajal* ». Mais c'est une vision un peu réductrice du fonctionnement du cerveau…

Denis Forest acquiesce. « *À se concentrer sur le neurone, on en oublie d'autres cellules cérébrales: les cellules gliales, à qui on n'a longtemps prêté qu'un rôle de soutien.* » Eh oui, gare à l'effet loupe! Pour 85 millions de neurones dans un cerveau humain, il faut compter 100 millions de cellules gliales! Ces dernières appartiennent à trois principaux groupes: les oligodendrocytes, qui fabriquent la myéline, indispensable gaine protectrice des neurones; la microglie, qui assure la fonction immunitaire dans le cerveau; et les astrocytes, en forme d'étoiles.

Nutrition, régulation, nettoyage, recyclage… Le rôle essentiel des astrocytes

Si la glie a si peu intéressé, c'est avant tout parce que, soumise à un courant électrique, elle reste de marbre. Il aura fallu attendre l'avènement des techniques de microscopie de pointe associées à la biologie moléculaire, au début des années 2000, pour observer leur activité métabolique et donc deviner l'envergure de leurs tâches, en particulier celles des astrocytes.

Ces derniers sont essentiellement connus pour leur rôle dans la nutrition des neurones : le glucose sanguin qu'ils pompent à grande vitesse est transformé en lactate, prémâché énergétique vite consommé par le neurone. On leur reconnaît également volontiers un rôle d'éboueur: ils recyclent les neurotransmetteurs inutilisés et se débarrassent des connexions neuronales excédentaires. Et cela ne s'arrête pas là. Car il est clair, depuis une dizaine d'années, que ces cellules régulent directement l'activité des neurones en libérant de petites molécules qui modifient l'activité des cellules environnantes. Difficile alors de continuer de les considérer comme secondaires pour la modélisation des fonctions mentales.

« *La découverte des cellules gliales et de leurs rôles complexes change la donne* », insiste Yves Agid, qui propose de regarder le cerveau comme une ville : les neurones constituant les rues et les boulevards, les cellules gliales les bâtiments qui bordent les avenues. De loin, la vie de la ville semble se résumer aux déplacements des voitures et des métros. Mais « *n'est-ce pas dans ses bâtiments que s'élabore la politique de la cité?* interroge le spécialiste. *Aujourd'hui, on ne doit plus négliger la moitié du cerveau pour comprendre la pensée.* » Le moment de passer de la théorie du neurone à la théorie du cerveau? **AGNÈS VERNET**

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #5

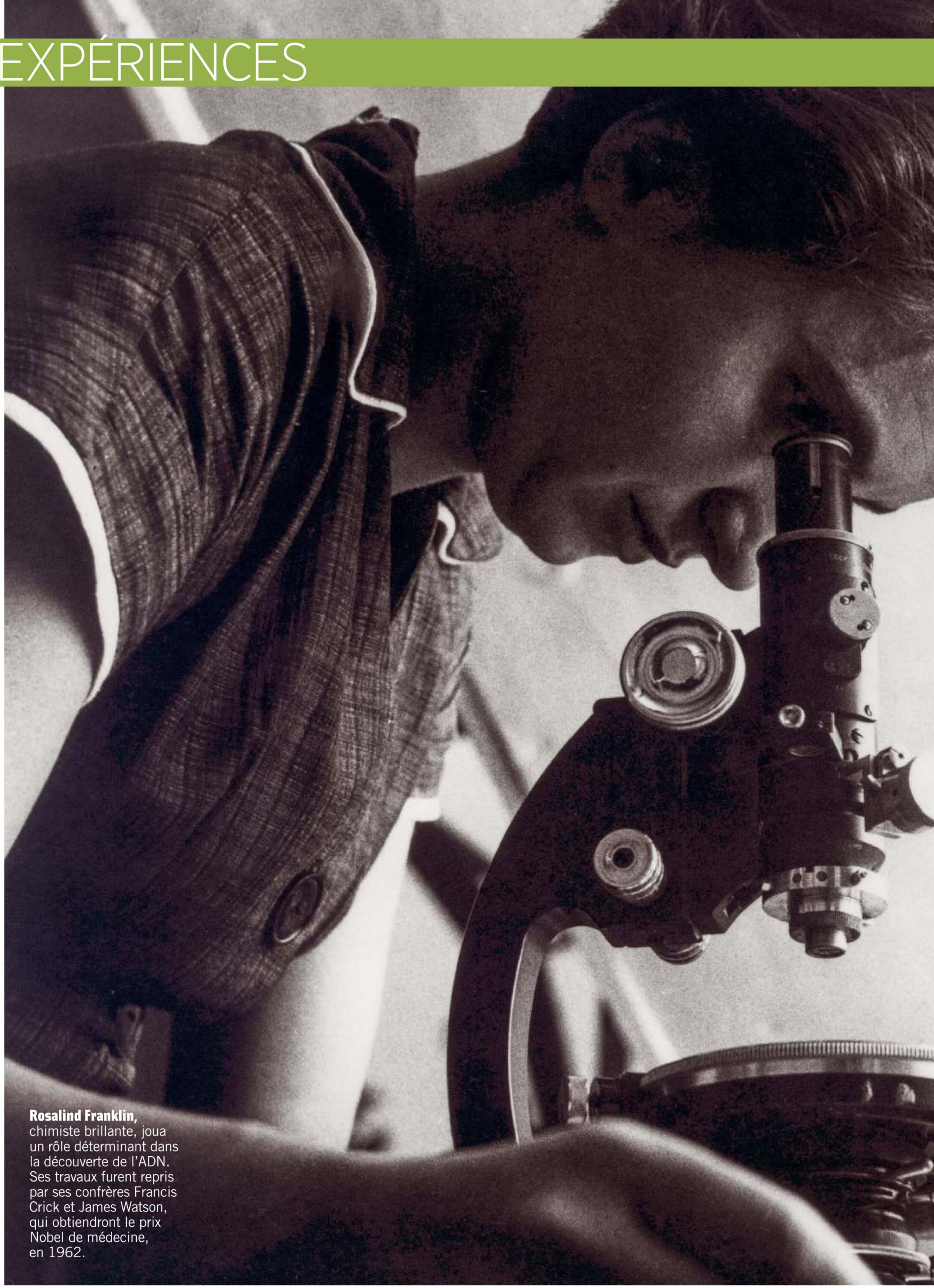
Les vaches laitières sont sensibles aux marques d'attention

Les exploitations laitières les plus sentimentales sont aussi les plus productives. C'est à cette conclusion que sont parvenus Catherine Douglas et Peter Rowlinson de l'université de Newcastle (Royaume-Uni), lauréats de l'Ig Nobel de médecine vétérinaire en 2009. Leur enquête, réalisée auprès de 516 exploitants, a révélé que les génisses avaient un rendement laitier supérieur de 200 litres et plus dans les établissements où le responsable juge important de connaître chaque animal. Et dans les troupeaux où chaque vache porte un nom, le rendement bondit de 258 litres! Soit 7 938 litres contre 7 680 litres par an. L'ambiance dans les exploitations est plutôt chaleureuse, 90 % des éleveurs pensant que leurs vaches ont des sentiments, 78 % qu'elles sont intelligentes. 46 % leur donnent des noms. **F. F.**

DENIS FOREST

« En définissant une unité fonctionnelle dans le cerveau, la théorie du neurone pose un problème : comment communiquent ces cellules ? De cette découverte découlent les concepts de synapse puis de neurotransmetteur »

Denis Forest, philosophe des sciences à l'université Paris I Panthéon-Sorbonne



Rosalind Franklin, chimiste brillante, joua un rôle déterminant dans la découverte de l'ADN. Ses travaux furent repris par ses confrères Francis Crick et James Watson, qui obtiendront le prix Nobel de médecine, en 1962.

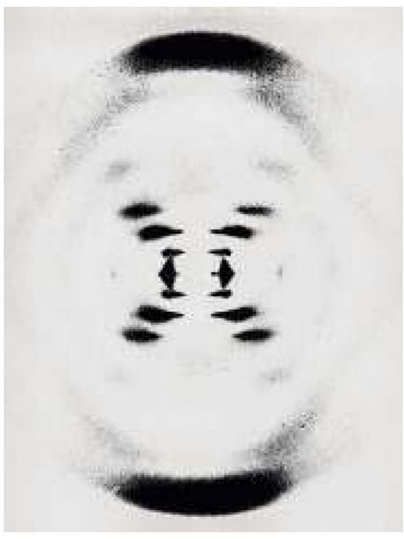
WORLD HISTORY ARCHIVE/ANN RONAN PICTURE LIBRARY/ COLL. CHRISTOPHEL

DES PETITS POIS À L'ADN, LA SAGA DU GÈNE

Un obscur moine féru de botanique, un généticien excentrique, une chimiste oubliée et plusieurs Prix Nobel… tous animés par la même obsession : l'expérimentation. Et la même obstination à déchiffrer les secrets de l'hérédité.

Comment, de l'union de deux êtres, peut-il en naître un troisième si semblable à ses parents mais pourtant unique ? Cette question brûlante de l'hérédité, de la transmission de caractères d'une génération à l'autre, fut l'objet de vifs débats dès l'Antiquité, de Pythagore à Platon. Puis, curieusement, les savants des deux millénaires suivants semblèrent presque se désintéresser de la question. Jusqu'à ce que, à l'aube du XXe siècle, la redécouverte d'obscurs travaux d'un moine autrichien ne signe le coup d'envoi d'une ère haletante ponctuée de découvertes en séries. Leur point commun : toutes semblent placées sous le signe du travail de laboratoire. Plus que l'observation, la réflexion ou l'intuition, ce sont les résultats d'une succession de protocoles expérimentaux rigoureux qui dévoileront finalement les secrets de l'hérédité.

Tout commence dans l'Autriche des années 1850. Plus précisément au monastère de Brno, où un jeune moine du nom de Gregor Mendel tente de comprendre, avant tout pour faciliter le travail de sélection et d'hybridation, comment les caractères d'une plante se transmettent à la génération suivante. Ce fils de paysan, formidable expérimentateur doublé d'un excellent botaniste, jette son dévolu sur un modèle simple : les plants de pois. Avec méthode, il sélectionne sept caractères facilement ●●●



SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

Le « cliché 51 » obtenu par Rosalind Franklin en 1953, première image de la structure en double hélice de l'ADN. Il sera montré à l'insu de la chercheuse à James Watson, qui racontera : *« Quand je vis la photo, je restai bouche bée et mon cœur se mit à battre la chamade. »*

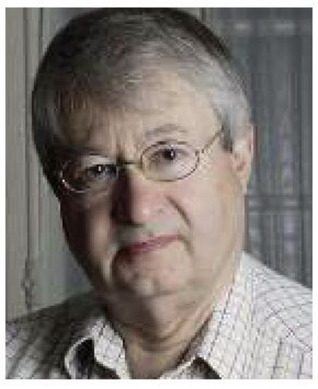
●●● observables (couleur des gousses, taille de la plante, texture des pois…) et commence ses croisements. Premier constat : lorsqu'une lignée pure donnant des fleurs blanches est croisée à une autre lignée pure aux fleurs violettes, les descendants présentent non pas une forme intermédiaire, mais eux aussi des fleurs violettes. Pour chaque caractère, une forme dominante semble ainsi prendre le dessus sur une autre, dite récessive. Mais en croisant les descendants aux fleurs violettes entre eux, le moine autrichien voit parfois, avec étonnement, ressurgir des plantes blanches, en moyenne une fois sur quatre. Il vient de découvrir le rôle de ce que les généticiens appelleront bien plus tard les allèles : l'allèle récessif donnant des fleurs blanches ne disparaît pas lors du premier croisement et peut à nouveau s'exprimer en l'absence d'un allèle dominant « fleurs violettes ».

Nettie Stevens, rapidement occultée par l'ombre écrasante de son directeur de thèse

« Mendel avait bien compris que pour tirer des lois générales de ces observations, il devait les reproduire sur un très grand nombre d'échantillons, souligne l'historien des sciences Michel Morange, professeur émérite à l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques (IHPST). *Heureusement, c'était un expérimentateur tenace et méthodique, reproduisant des protocoles aussi délicats que la fécondation manuelle sur des milliers de plantes. »* Durant près de dix ans, le moine triera, croisera et observera quelque 28 000 plants de pois et presque 400 000 graines. Et consignera minutieusement chaque croisement, chaque caractère, dans de vastes tableaux. L'analyse statistique de ce travail titanesque permettra à Mendel de formuler les premières lois de l'hérédité, celles qui porteront son nom… bien après sa mort en 1884.

Présentés en 1865 devant une petite assemblée à Brno, les travaux de Mendel tombent rapidement dans l'oubli. *« Ses résultats ont pu être jugés intéressants dans le cadre précis des hybrides végétaux, mais sans qu'on leur prête une attention particulière »*, explique Michel Morange. Pour l'historien des sciences, la redécouverte de ses travaux plus de trente ans après s'explique par l'arrivée entretemps d'un autre personnage : Darwin. *« Avec la théorie de l'évolution, il devient tout à coup crucial de comprendre comment des variations évolutives peuvent être transmises et maintenues, ce qui remet au goût du jour les questions autour des mécanismes de l'hérédité. »* Durant l'année 1900, pas moins de trois botanistes saisissent, chacun de leur côté, toutes les implications des travaux de Mendel. Le moine autrichien et ses petits pois se retrouvent sous le feu des projecteurs, donnant naissance à une discipline qui prendra plus tard le nom de « génétique ».

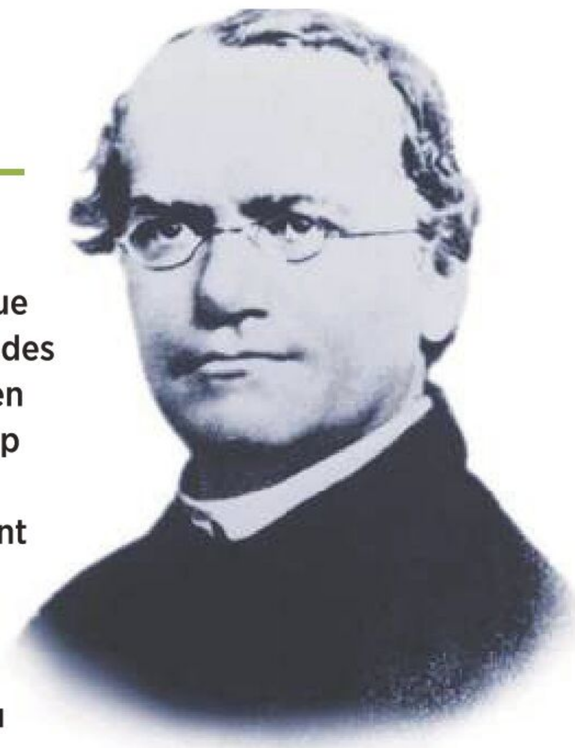
Une question découle logiquement des travaux de Mendel : par quel moyen l'information héréditaire passe-t-elle d'une génération à une autre ? *« À l'époque, ces particules d'information, ces "gènes", restent une notion très abstraite, comme l'a été longtemps l'atome »*, rappelle Michel Morange. Rapidement, plusieurs chercheurs soupçonnent les chromosomes d'en constituer le support physique. En 1905, Nettie Stevens en apporte l'une des preuves les plus flagrantes. Cette brillante biologiste américaine observe les chromosomes d'un coléoptère et constate qu'une paire en particulier présente un chromosome plus petit, retrouvé uniquement chez les mâles. Elle vient de mettre au jour les chromosomes sexuels et, par là même, le support des gènes. Le nom de Nettie Stevens sera pourtant occulté par l'ombre écrasante de son directeur de thèse, véritable star de la génétique, le futur nobélisé Thomas Morgan.



REA

« Au début des années 1950, pour beaucoup, l'ADN ne pouvait être le porteur de l'information génétique. Les protéines, plus complexes, semblaient de bien meilleures candidates… »

Michel Morange, professeur émérite à l'Institut d'histoire des sciences et des techniques



SPL/SUCRÉ-SALÉ

Le botaniste et moine Gregor Mendel formulera les premières lois de l'hérédité.

Mendel a-t-il triché ?

En 1936, alors que Gregor Mendel est reconnu par toute la communauté scientifique comme « le père de la génétique », le biologiste et statisticien britannique Ronald Fisher lâche un pavé dans la mare : les résultats des milliers de croisements effectués par le moine autrichien sont trop beaux pour être vrais, les chiffres obtenus trop proches des prédictions théoriques. Ayant compris à quelles proportions s'attendre, Mendel aurait sciemment mis de côté les résultats qui ne collaient pas à ses attentes. Une véritable fraude scientifique ? Après Fisher, de nombreux auteurs se sont écharpés sur la question, remettant parfois en cause les conclusions du biologiste anglais. L'historien des sciences Michel Morange, lui, plaide la bonne foi. *« Pour certains croisements, Mendel énonce clairement qu'il obtient des résultats inattendus dont il choisit de ne pas tenir compte, soupçonnant un raté durant l'expérience. À partir du moment où il le reconnaît volontiers dans ses publications, peut-on réellement parler de fraude ? »* L'historien rappelle d'ailleurs qu'encore aujourd'hui en sciences, il n'est pas rare de mettre de côté des résultats apparemment aberrants…

GETTY IMAGES

Tout semble séparer Mendel, le moine autrichien réservé et solitaire, de l'excentrique et hyperactif Morgan de l'université Columbia à New York. Les deux hommes partagent toutefois une même obsession pour l'analyse méthodique des croisements. Là où Mendel regardait la couleur des fleurs ou des graines, Morgan scrute la forme des pattes ou des ailes de ses drosophiles. Comme Mendel, Morgan croise des lignées pures, puis leurs descendants, tout en noircissant d'immenses tableaux de résultats. Dans son laboratoire, « la salle des mouches », aux étagères croulant sous des centaines de pots vrombissants, le chercheur américain tombe un jour sur une mouche aux yeux blancs, et non pas rouges comme ses congénères. Il croise cette mouche avec une autre aux yeux rouges, obtient d'autres mouches aux yeux rouges et conclut que le gène « yeux blancs » est récessif. En croisant entre eux ces insectes de la nouvelle génération, il voit lui aussi réapparaître çà et là des mouches aux yeux blancs, en moyenne une fois sur quatre. Mais il remarque une étrangeté : toutes ces mouches aux yeux blancs sont des mâles. Seule explication possible, le gène codant pour la couleur des yeux se trouve sur le chromosome déterminant le sexe. En multipliant les croisements et les caractères observés, l'équipe de l'université Columbia parvient à déterminer quels caractères sont associés, et donc situés sur un même chromosome.

FILIPPO CIABRELLI, CNRS, UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Ces trois drosophiles sont porteuses de la même séquence d'ADN codant pour des yeux rouges. Des chercheurs ont cependant réussi, en altérant l'expression d'un gène, à obtenir des insectes aux yeux blancs, jaunes ou rouges et à maintenir ce caractère épigénétique de génération en génération.

Une pluie de prix Nobel sur la « salle des mouches » de l'université Columbia

Pourtant, des aberrations surviennent ponctuellement : des caractères qui semblaient indissociables se trouvent parfois séparés. Par exemple, si les mouches aux ailes courtes ont presque toutes un corps foncé, certaines arborent exceptionnellement un corps clair.

Loin de décourager Morgan, celui-ci en déduira l'existence d'un phénomène crucial en génétique, le crossing-over, ou lorsque des chromosomes d'une même paire s'entremêlent et s'échangent des parties de leur ADN, permettant un brassage génétique. Cette découverte majeure en amène une autre : la fréquence de ces aberrations semble dépendre des deux caractères observés. Thomas Morgan comprend alors qu'il va pouvoir en déduire la distance entre les deux gènes codant pour ces caractères. Plus ces derniers sont fréquemment séparés, plus la portion du chromosome se trouvant entre les deux gènes en question doit être grande, augmentant la probabilité qu'un crossing-over y survienne. Peu à peu, Morgan et son équipe parviennent à dresser la toute première « carte génétique » d'un organisme, indiquant les positions relatives de ses gènes. De quoi faire tomber une pluie de prix Nobel sur les occupants de la « salle des mouches » de Columbia.

Trois décennies plus tard, un mystère demeure pourtant. Certes, les gènes sont portés par les chromosomes, mais ●●●

La molécule d'ADN, porteuse de l'information génétique, est constituée de deux chaînes complémentaires enroulées en hélice.

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #6

Harengs : le pet comme signe de ralliement ?

Les harengs communiqueraient au moyen de pets : les études étayant cette hypothèse élégante ont été récompensées en 2004 d'un Ig Nobel de biologie. Deux groupes de chercheurs ont ainsi découvert que les harengs expulsent par l'anus de l'air de leur vessie natatoire, produisant un son répétitif à haute fréquence baptisé *fast repetitive tick* (FRT). Ces rafales de bulles sonores sont notamment produites la nuit ou lorsque le nombre de harengs proches augmente, étayant l'hypothèse que les FRT ont une fonction sociale assurant une meilleure cohésion du banc. Durant la guerre froide, ces sonorités avaient mis la marine suédoise en alerte : elle les avait prises pour des intrusions de sous-marins soviétiques. Plus récemment, on a découvert que d'autres espèces de poissons, comme les saumons de l'Atlantique, produisent ce même type de sons… sans qu'il y ait toujours émission de bulles. **F. F.**

La révolution CRISPR-Cas9

Pour en découvrir toujours plus sur le rôle des gènes, les biologistes du XXIe siècle peuvent compter sur un nouvel outil incroyablement puissant : CRISPR-Cas9. Ce complexe moléculaire se trouve naturellement chez certaines bactéries pour lutter contre les infections virales. La protéine Cas9 embarque en effet de courtes séquences ARN spécifiques de gènes viraux : lorsque le complexe repère un tel gène dans la cellule bactérienne, celui-ci est tout simplement découpé, et donc inactivé. En 2012, deux chercheuses – la Française Emmanuelle Charpentier et l'Américaine Jennifer Doudna – parviennent à détourner ce système bactérien pour l'utiliser dans n'importe quelle cellule, ciblant n'importe quel gène. Il devient alors possible de créer un complexe CRISPR-Cas9 doté de la séquence ARN souhaitée pour découper un gène spécifique. De quoi inactiver un gène donné pour décrypter son rôle, ou encore induire une maladie génétique chez un animal modèle pour mieux l'étudier. Mieux, en détournant certains mécanismes de réparation de l'ADN, cette technologie promet de remplacer le gène découpé par une séquence de son choix. *« Modifier avec précision la séquence ADN, tous les généticiens en rêvaient depuis longtemps*, raconte Carine Giovannangeli, chercheuse au Laboratoire structure et instabilité des génomes (MNHN/CNRS/Inserm). *Il existait déjà plusieurs techniques, mais ce qui rend celle-ci révolutionnaire, c'est son efficacité, sa rapidité et sa grande facilité d'utilisation. »* Offrant en 2020 un prix Nobel à ses découvreuses, CRISPR-Cas9 a d'ores et déjà permis une avalanche d'avancées en recherches fondamentale, thérapeutique et agronomique. Des chercheurs israéliens l'ont par exemple utilisé pour rendre résistants des concombres à des virus dévastateurs. Pour bon nombre de biologistes, ses promesses en font la découverte majeure de ces dernières décennies.

L'ORÉAL

Emmanuelle Charpentier, inventrice avec Jennifer Doudna des « ciseaux moléculaires » CRISPR-Cas9.

●●● sous quelle forme ? Les protéines qui accompagnent ces chromosomes ? L'ADN ? Cette dernière hypothèse ne convainc… personne. L'un des spécialistes de l'ADN le décrit même comme une *« molécule stupide »*, une simple succession de quatre bases azotées – les fameux A, T, C et G –, comme le rappelle Michel Morange. *« Pour beaucoup, l'ADN devait être une sorte de support donnant sa forme au chromosome, en tout cas pas le porteur de l'information génétique. Les protéines, plus complexes, semblaient de bien meilleures candidates. »*

C'est encore une fois un protocole minutieux qui permettra de résoudre le mystère. Au prestigieux institut Rockefeller de New York, les chercheurs Oswald Avery, Colin MacLeod et Maclyn McCarty revisitent, en 1944, une expérience célèbre autour d'un pneumocoque. Cette bactérie se retrouve sous deux formes : une souche R, sans danger, et une souche S, très virulente. Lorsque cette dernière est détruite par la chaleur, elle perd bien sûr sa virulence… et pourtant, mise en contact avec des bactéries vivantes de la souche R, celles-ci deviennent à leur tour virulentes ! Des molécules contenues dans la souche détruite ont transmis l'information « virulence ». Mais lesquelles ? Avery et ses collègues testent méthodiquement chaque composant de la souche S détruite. Ils ajoutent de l'alcool pour dissoudre les lipides : la virulence est transmise. Du chloroforme pour précipiter les protéines, ou une enzyme digérant l'ARN : *idem*. Mais lorsque l'équipe ajoute une enzyme dégradant l'ADN, la souche R reste inoffensive. Même Avery a du mal à y croire : c'est bel et bien l'ADN qui transmet l'information génétique !

Quand le régime alimentaire d'une souris impacte la couleur du pelage de ses petits

De stupide, l'ADN devient en quelques années central, clef de l'hérédité. Plusieurs équipes à travers le monde se lancent dans une course effrénée pour découvrir sa structure et en déduire son mode de fonctionnement. En 1952, à Londres, loin de cette frénésie, une jeune femme du nom de Rosalind Franklin se débat avec un générateur à rayons X. *« Elle projette ces rayons sur une fibre d'ADN et observe la diffraction qui en résulte sur une plaque photographique*, décrit la directrice de recherche Pascale Launois, du Laboratoire de physique des solides (CNRS/Paris-Saclay). *Après de multiples*

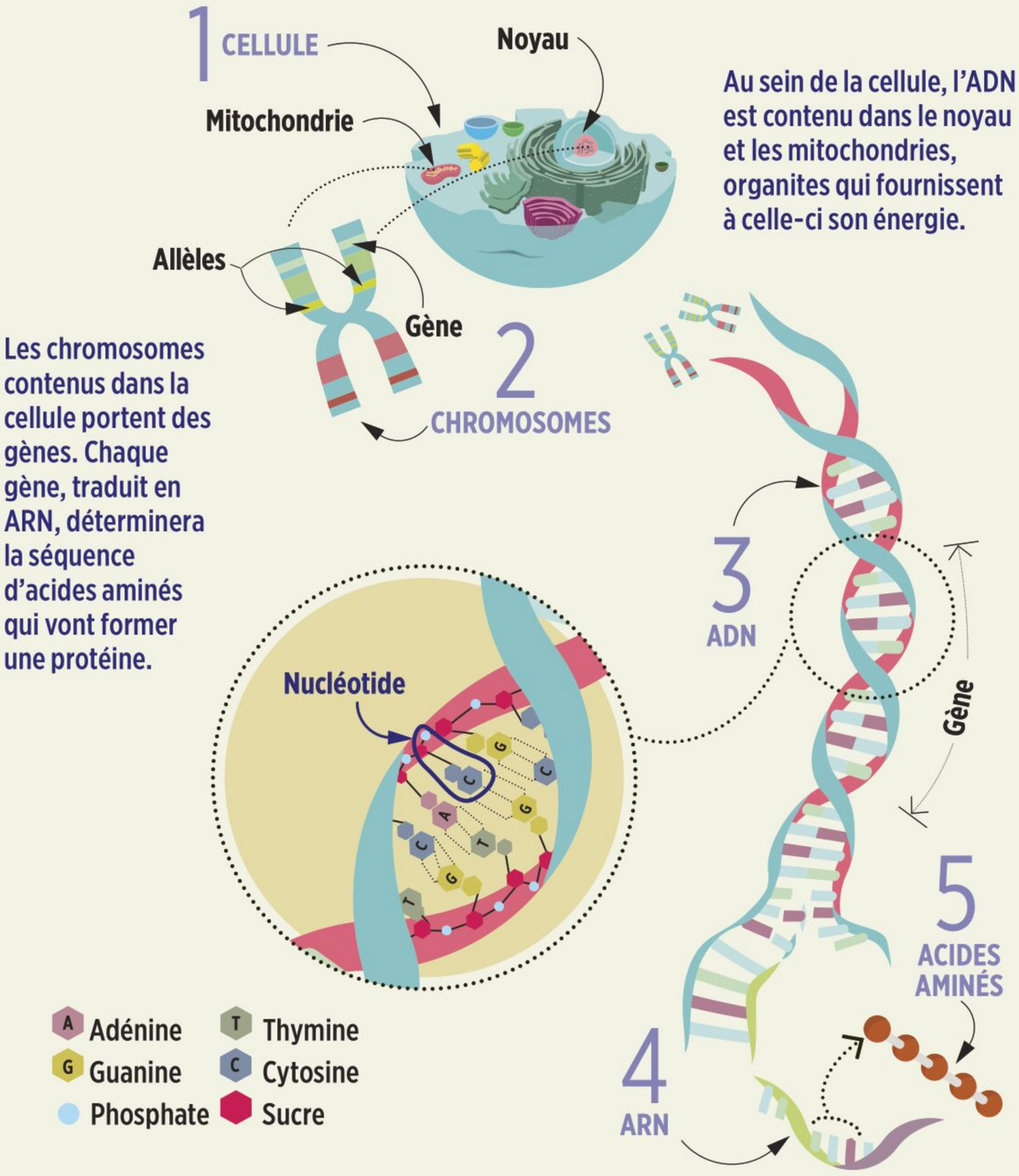
essais à jouer avec l'humidité de la fibre d'ADN, elle obtient le fameux "cliché 51", passé à la postérité. On y trouve toutes les informations essentielles sur la structure de l'ADN: la forme en double hélice, les positions relatives des deux hélices, la distance entre les bases… » Mais l'un des collègues de la chercheuse montre le cliché à un biologiste américain de passage. Celui-ci n'est autre que James Watson, dont la renommée explosera deux mois plus tard pour avoir décrit avec Francis Crick la structure de l'ADN… en partie grâce au cliché de Rosalind Franklin.

La dernière pièce du puzzle trouvée, le reste va à toute allure. En quelques années, on décrypte le code permettant de passer des bases azotées de l'ADN aux protéines, les ARN messagers… L'essentiel est là, presque limpide. Les chromosomes issus pour moitié de chaque parent sont constitués d'ADN, codant pour des protéines, briques élémentaires déterminant les caractéristiques physiques d'un organisme. Les mystères de l'hérédité sont résolus. Sauf que… Dans les années 1990, ce modèle bien huilé va être mis à mal par plusieurs expériences, comme celles autour du gène agouti. Des souris d'une même portée, possédant la même version de ce gène déterminant la couleur du pelage, peuvent être soit brunes, soit jaune orangé. Deux caractères différents pour un même patrimoine génétique. Par quel miracle ? En 1998, une équipe de l'Arkansas montre qu'en nourrissant de telles souris gestantes avec des compléments riches en groupements méthyle – de petits éléments chimiques se fixant sur l'ADN –, leur progéniture compte bien plus de souris brunes que jaunes. Une fois fixés, ces groupements méthyle empêchent la traduction de l'ADN en protéine, celle-là même qui induit la couleur jaune du pelage. « *La méthylation de l'ADN n'est qu'une des facettes de l'épigénétique, qui regroupe tous les mécanismes non codés par l'ADN modifiant l'expression des gènes de manière stable et héritable* », décrit la directrice de recherche Inserm Déborah Bourc'his.

Mais quel rôle joue l'épigénétique dans l'hérédité ? Concernant le gène agouti, une équipe australienne observait en 2006 que le régime de souris gestantes impactait la couleur du pelage de leurs petits, mais aussi de la génération suivante. Chez la drosophile, des chercheurs de l'Institut de génétique humaine de Montpellier annonçaient en 2017 pouvoir maintenir de génération en génération des mouches aux yeux blancs, pourtant porteuses de gènes codant pour des yeux rouges. « *Chez les mammifères, la transmission héréditaire de marques épigénétiques fait encore débat, car il existe des mécanismes de remise à zéro à chaque génération, mais chez d'autres organismes comme les plantes, des caractères liés à des marques épigénétiques peuvent être transmis de manière très stable sur plusieurs générations,* décrit Déborah Bourc'his, qui refuse pour autant d'y voir la fin de la vision mendélienne de l'hérédité. *L'épigénétique nous apprend que les gènes ne font pas tout, mais il ne faut pas tomber dans l'excès inverse : c'est une nouvelle couche qui s'ajoute par-dessus les mécanismes de la génétique traditionnelle.* » De quoi enrichir sans le remettre en question l'héritage des Mendel, Morgan, Avery… et continuer l'enquête sur les secrets de l'hérédité débutée il y a plus d'un siècle et demi dans le jardin d'un moine autrichien.

YANN CHAVANCE

L'hérédité en quelques mots



LEXIQUE

ADN Support de l'information génétique, contenu dans le noyau de la cellule et les mitochondries. Toutes les cellules de l'organisme ont le même ADN, mais n'expriment pas les mêmes gènes dans les différents organes.

Allèle Une des formes que peut prendre un même gène. Les allèles occupent la même position sur les chromosomes paternel et maternel.

Base Chacune des substances chimiques reliant les deux brins d'ADN : adénine, guanine, thymine et cytosine. Une base, un sucre et un phosphate forment un nucléotide.

Chromosome Très longue chaîne d'ADN comprenant une succession de gènes séparés par des parties non codantes. Chaque cellule humaine en comprend 23 paires, composées chacune d'un chromosome venant de la mère, l'autre du père.

Gène Segment d'ADN constitué d'une séquence de nucléotides, permettant la synthèse d'une protéine donnée.

Génome Ensemble du matériel génétique d'un organisme.

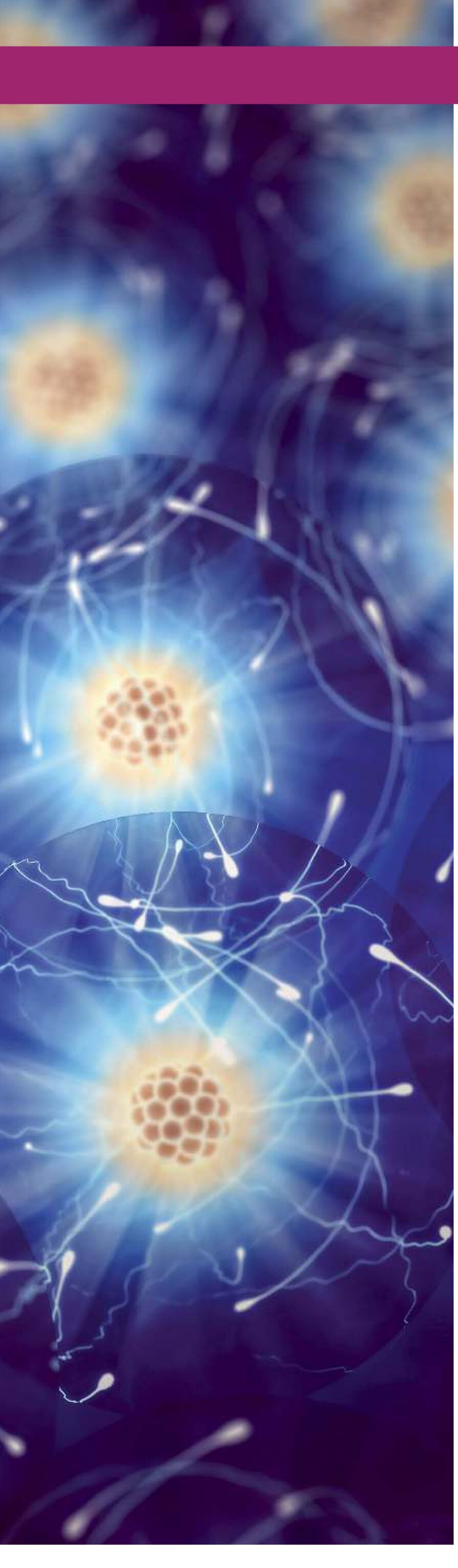
Siddhartha Mukherjee,
Il était une fois le gène,
Flammarion, 2017

André Gallais,
Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes,
Éditions Quae, 2018

Évelyne Heyer,
L'Odyssée des gènes,
Flammarion, 2020

INTUITION

Structure atomique.
Des atomes et leur nuage d'électrons. Vue d'artiste.



SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

L'ATOME, D'UNE THÉORIE ANTIQUE À LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Le Grec Démocrite l'imaginait comme la plus petite unité de matière. Deux mille ans plus tard, la science l'érigera en socle inébranlable de la physique... avant de le casser en particules infimes, parfois insaisissables.

Pour le physicien contemporain, le moindre atome est un monde complexe, où l'on discerne un noyau peuplé de protons et neutrons, eux-mêmes constitués de quarks, encerclé par une escadrille d'électrons – pardon, de « nuages de probabilité de présence » d'électrons. Bref, tout le contraire de ce qu'implique l'étymologie du mot atome, du grec ατομος (*átomos*), qui signifie « insécable ». Car c'est cela que veut dire initialement ce vocable forgé par les Grecs anciens : qu'il s'agit de la plus petite particule concevable de matière. Le *Vaisheshika Sutra*, texte fondateur de l'école de philosophie indienne *astika*, rédigé sans doute autour du v^e^ siècle avant notre ère, en dit à peu près autant. Or, depuis l'Antiquité, les choses ont bien changé. Et de multiples fois. *« L'atome a été réinventé à chaque époque »,* résume Bernadette Bensaude-Vincent, philosophe et historienne des sciences et des techniques *(lire la Rencontre p. 6-9)*.

On attribue généralement au philosophe Démocrite d'Abdère (460-370 av. J.-C.) la paternité de l'atomisme grec, même si certains auteurs désignent son maître, Leucippe, comme son véritable initiateur. ●●●

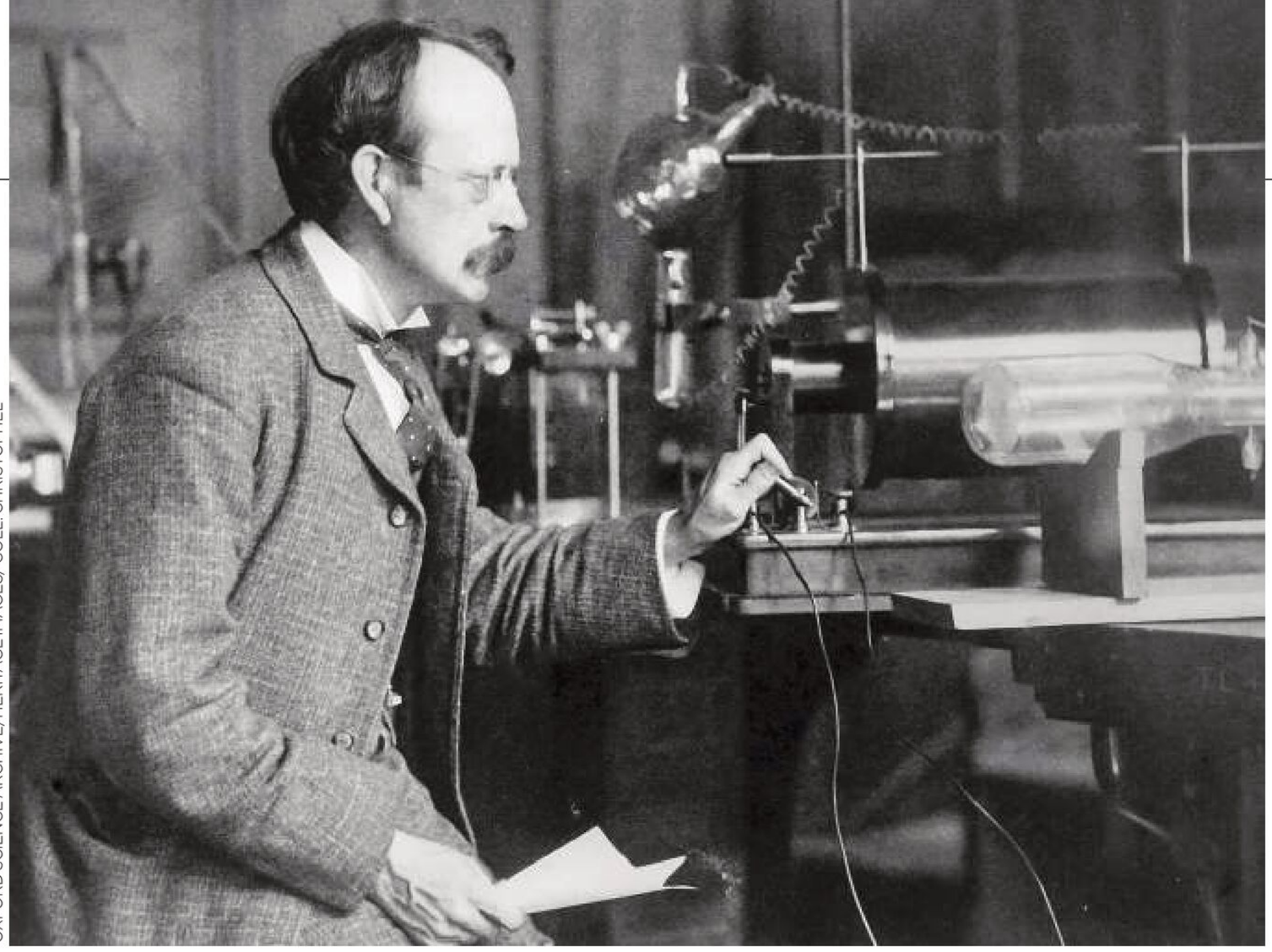
Bernadette Bensaude-Vincent, *Matière à penser. Essais d'histoire et de philosophie de la chimie,* Presses universitaires de Paris Nanterre, 2008

Bernadette Bensaude-Vincent et Catherine Kounelis, *Les Atomes, une anthologie historique,* Presses Pocket, 1991

INTUITION

●●● *« L'œuvre de Démocrite est considérable mais il n'en reste presque rien,* note l'historienne. *On la connaît surtout par la critique qu'en fait Aristote (384-322 av. J.-C.). Tandis que Démocrite rapporte toute la variété des corps matériels à une matière unique, homogène, constituée de petites unités indivisibles et diversement agencées : les atomes, Aristote défend une théorie issue de la doctrine d'Empédocle (490-430 av. J.-C.), celle des quatre éléments : terre, air, eau, feu, dont le mélange produit la variété des corps observés. »*

L'atome ne plaît donc pas à tout le monde… Pendant plus de vingt siècles, la vision aristotélicienne de la nature et de la matière dominera, et l'atomisme sera réduit au silence. Il ne réapparaîtra en Europe qu'à partir du XVIIe siècle. *« En particulier,* précise Bernadette Bensaude-Vincent, *il est redécouvert par le mathématicien français Pierre Gassendi (1592-1655). Pour lui, toute la réalité matérielle est composée de vide et d'atomes. Par ailleurs, l'atome inspire les théories mécanistes, soutenues notamment par Descartes (1596-1650), qui reposent sur l'idée qu'il n'existe que la matière et le mouvement. Le philosophe français n'est pourtant pas atomiste. »*



OXFORD SCIENCE ARCHIVE/HERITAGE IMAGES/ COLL. CHRISTOPHEL

Le père de l'électron. C'est en étudiant les rayons cathodiques que Joseph John Thomson découvrit ces particules chargées négativement.

Pour lui, en quelque sorte, l'espace est plein. *« Une discussion enflammée entre Gassendi et Descartes à propos du vide est restée dans les annales. Quant à Newton, il est atomiste, même si c'est à sa manière. Il parle de "particules", de "corpuscules" et de forces d'attraction s'exerçant entre eux. »*

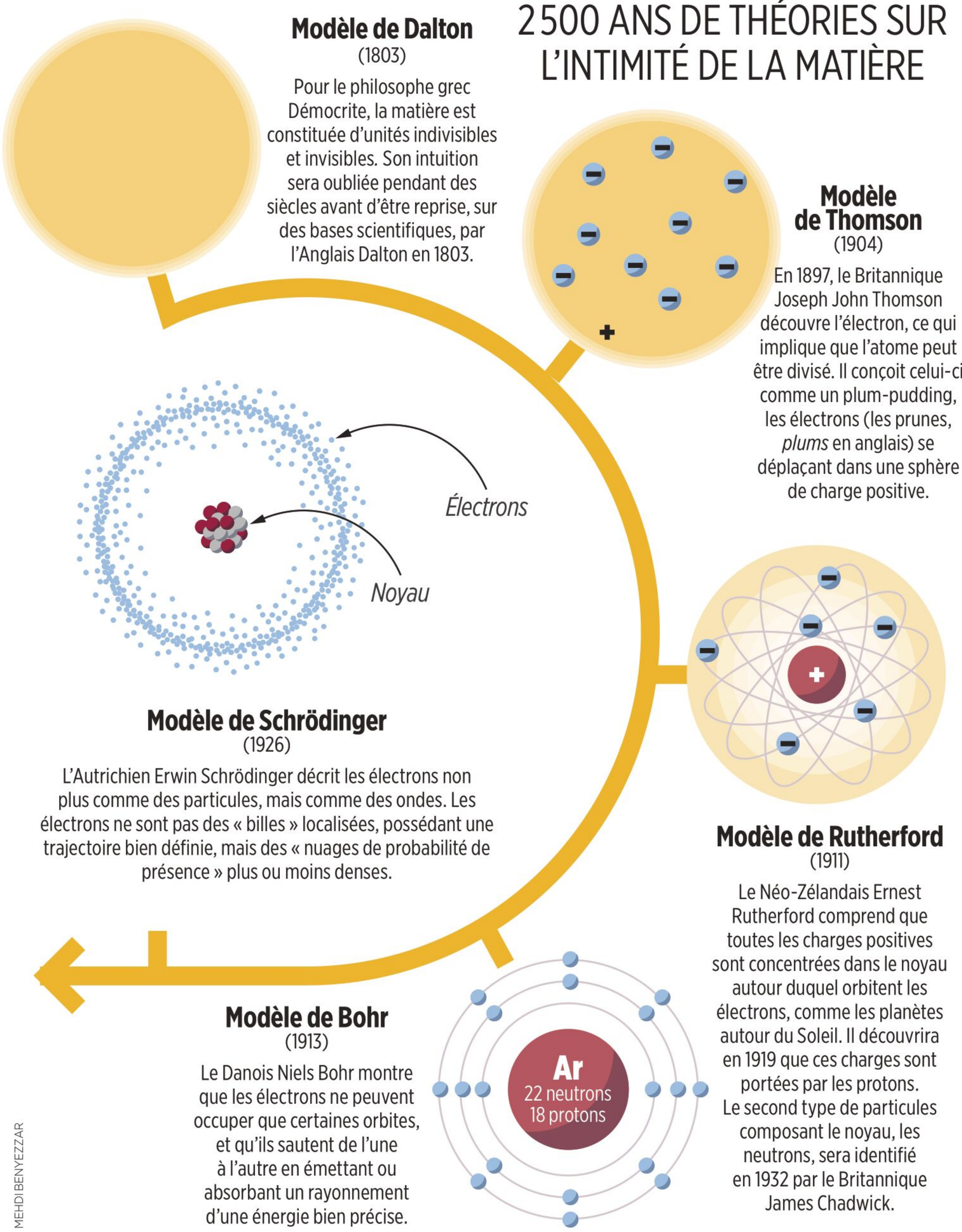
Sodium, potassium, calcium… la pile de Volta permet de repérer de nouveaux éléments

Un événement important a lieu en 1800. Cette année-là, le physicien et chimiste italien Alessandro Volta (1745-1827) invente la pile qui porte son nom. Cette pile Volta lance une nouvelle discipline, l'électrochimie, qui permettra de repérer de nombreux nouveaux éléments. Le physicien et chimiste britannique Humphry Davy (1778-1829) découvre ainsi le sodium et le potassium en 1807, ainsi que le calcium, le magnésium et le baryum l'année suivante. Au début du XIXe siècle, les conditions sont réunies pour que soit proposée la première théorie atomique scientifique, reposant sur une base expérimentale. C'est le chimiste et physicien britannique John Dalton (1766-1844) qui la formule en 1803. Dans son modèle, l'atome est l'unité minimale de combinaison chimique, et tous les atomes d'un même élément sont identiques. *« Dalton s'appuie notamment sur les travaux de Lavoisier »,* indique Olivier Darrigol, historien des sciences à l'université de Paris. Lavoisier a formulé la loi de la conservation de la masse : dans une réaction chimique, la masse totale des produits est égale à celle des réactifs. Il utilise également les travaux d'un autre chimiste français, Joseph Louis Proust (1754-1826), qui a formulé en 1799 la « loi des proportions définies » : quand on décompose une substance chimique, les rapports de masses entre les constituants ne varient pas. *« Dalton publie la première liste des masses atomiques de diverses substances,* ajoute Olivier Darrigol, *en prenant*

Les prédictions de Mendeleïev

On considère souvent que c'est dans l'ouvrage *The Sceptical Chymist*, publié en 1661 par le physicien et fervent atomiste irlandais Robert Boyle, qu'est pour la première fois définie la notion moderne d'élément chimique. Dans son *Traité élémentaire de chimie,* publié en 1789, Lavoisier en distingue une trentaine, dont le tungstène et le molybdène, découverts quelques années plus tôt. Il les catégorise selon leurs propriétés et distingue les *« substances simples métalliques, oxydables et acidifiables »* des non métalliques. En 1803, John Dalton, le père de la théorie moderne des atomes, publie la première liste d'éléments classés selon leur poids atomique (ou « masse atomique »). Au cours du XIXe siècle, on en découvrira près de cinquante, grâce notamment à deux inventions. L'électrolyse, facilitée par la toute nouvelle pile Volta, permet en Angleterre à Humphry Davy de découvrir entre 1807 et 1808 le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium et le baryum. Et en 1860, c'est en Allemagne que Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen publient coup sur coup le principe de l'analyse spectrale et la découverte, par ce moyen, du césium et du rubidium.

Dès 1817, l'Allemand Johann Döbereiner avait introduit la notion de « triade » : la masse atomique du strontium, par exemple, est égale à la moyenne des masses atomiques du calcium et du baryum… Or ces trois éléments ont des propriétés chimiques semblables. Le premier « tableau périodique » sera publié en 1865 par le Britannique John Newlands. Il comporte 62 éléments, disposés selon sa « loi des octaves », car ils ont des propriétés semblables, a-t-il remarqué, tous les huit éléments… Mais c'est celui de Dmitri Mendeleïev, publié en 1869, que l'histoire retiendra. Peut-être parce que le chimiste russe prédit l'existence d'une douzaine d'éléments encore inconnus, comme l'éka-aluminium… découvert dès 1875 et baptisé gallium. Suivi par l'éka-bore (scandium), en 1879. Et l'éka-silicium (germanium) en 1886. Depuis la synthèse en 2010 de l'élément 117, le tennesse (Ts), le tableau, auquel ont été apportées de nombreuses corrections et additions, est complet. Il comporte 118 éléments, allant de l'hydrogène (H) à l'oganesson (Og). Aux 94 éléments naturels identifiés s'en ajoutent 24 prévus par la théorie et synthétisés à l'aide d'accélérateurs de particules.



comme référence l'hydrogène, auquel il assigne une masse égale à 1 par convention. »

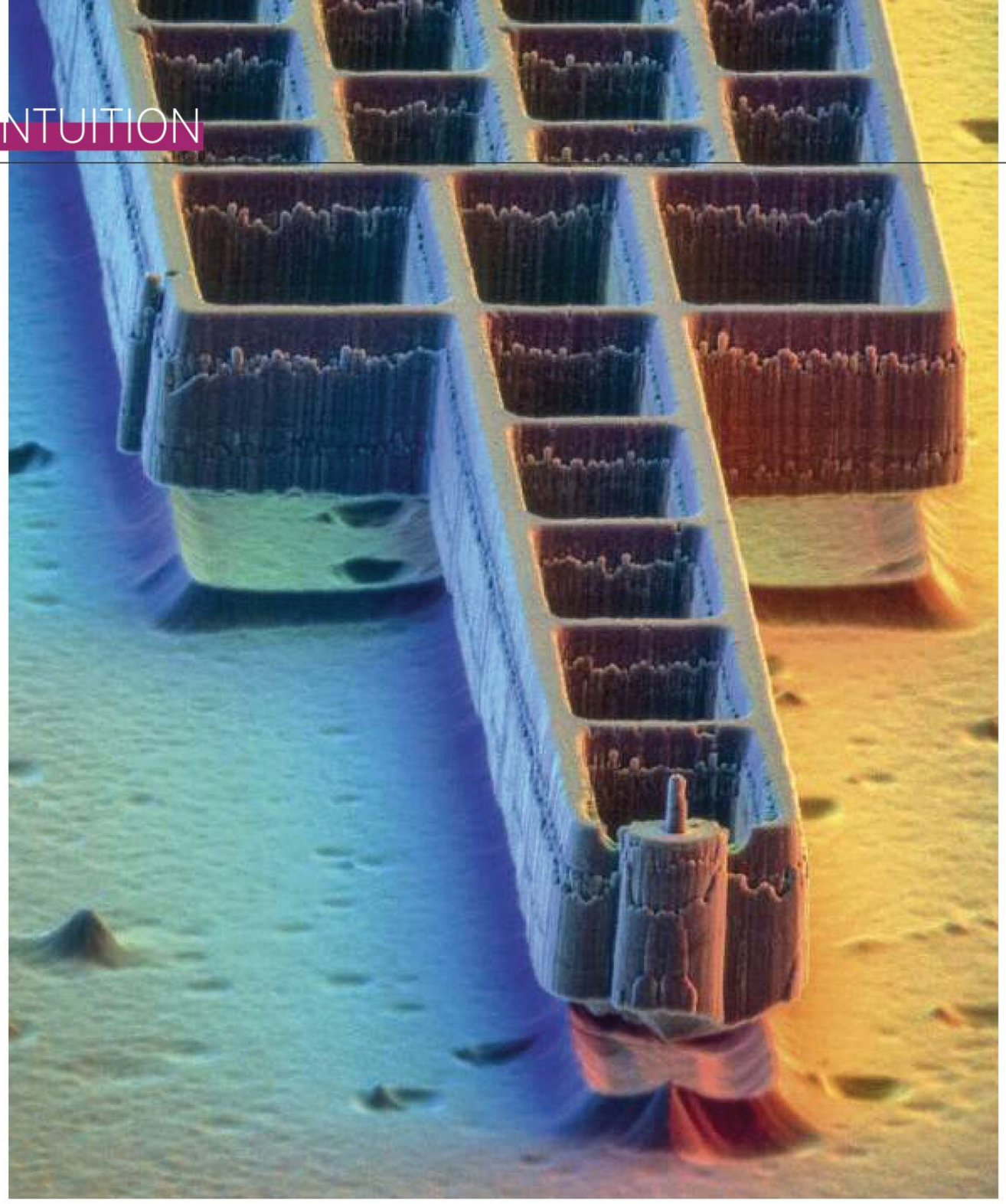
Pendant tout le XIXe siècle, l'atome, à la croisée de la physique et de la chimie, est encore pensé comme une unité insécable. Le XXe siècle va le casser. *« L'année 1897 marque un tournant fondamental, avec la découverte de l'électron par le physicien britannique Joseph John Thomson (1856-1940) »,* rappelle Bernadette Bensaude-Vincent.

Préalable essentiel à cette découverte : l'invention, en 1878, du tube cathodique par le Britannique William Crookes (1832-1919). Un tube de verre sous vide, dans lequel on provoque, entre deux électrodes soumises à une forte tension, l'émission de « rayons cathodiques », invisibles mais qui génèrent une fluorescence en percutant le verre *(lire aussi p. 62-66).* Thomson montre qu'un faisceau cathodique est dévié par un champ électrique créé par deux plaques placées face à face sur son trajet. Plus précisément, il est attiré par la plaque chargée positivement : le physicien en déduit que ce faisceau est constitué de particules chargées négativement. Il découvre également qu'un champ magnétique peut lui aussi dévier le faisceau, une observation qui lui permet de déterminer le rapport masse sur charge de ces particules. Leur masse est très inférieure à celle de tous les atomes connus, environ 1/2000 de celle de l'hydrogène (on l'estime aujourd'hui à 1/1836). ●●●

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #7

Comment le pic-vert résiste aux chocs

Tempête sous un crâne ! Jusqu'à 12 000 coups de bec quotidiens à la fréquence de 20 chocs par seconde, et des forces de décélération atteignant 1200 g à l'impact : le pic-vert est un défi physique. Les travaux d'Ivan R. Schwab et de Philip R. A. May, de l'université de Californie, ont reçu en 2006 l'Ig Nobel d'ornithologie pour avoir expliqué comment les pics-verts parviennent à supporter ces chocs incessants. L'oiseau est doté d'un crâne épais. Un os assez spongieux et des mandibules, tenues par de puissants muscles, forment une structure robuste qui amortit et répartit la force de l'impact vers la base et l'arrière du crâne, épargnant le cerveau. La frappe est d'une perpendicularité parfaite pour éliminer les forces de cisaillement et une paupière vient protéger l'œil des débris projetés tout en assurant qu'il reste dans son orbite ! À cela s'ajoute un muscle commandant la langue qui fait le tour du crâne et sert d'amortisseur pour les chocs affectant le cerveau. Cette mécanique millimétrée pourrait inspirer la conception de casques de protection pour les motards, ouvriers, sportifs… **F. F.**



SCHARF DAVID/ SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

La pointe, vue par microscope électronique à balayage, d'un microscope à effet tunnel, qui utilise les propriétés quantiques de l'électron. Constituée de seulement quelques atomes, elle permet de déterminer le profil de la surface d'un objet.

●●● Il en déduit qu'il est constitué de particules « subatomiques », chargées négativement, qui se trouvent dans tous les atomes : les électrons.

On désigne souvent le modèle atomique proposé par Thomson en 1904 par la formule « plum-pudding » : l'atome est vu comme un gâteau dont la pâte est chargée positivement et dans laquelle flottent des électrons (*plum* : prune en anglais) négatifs. *« C'est une révolution silencieuse,* estime Bernadette Bensaude-Vincent. *L'atome est en fait sécable ! »* Très vite, le physicien français Jean Perrin (1870-1942) y voit *« un petit monde fourmillant à explorer ».*

C'est à Ernest Rutherford (1871-1937), le père de la physique nucléaire, que l'on doit l'étape suivante. Le physicien britannique a découvert que l'uranium émet deux rayonnements distincts, qu'il appelle alpha et bêta : d'une part des particules lourdes chargées positivement (noyaux d'hélium) et de l'autre des particules plus légères et chargées négativement (électrons). Il conçoit une expérience qui lui permet de postuler l'existence d'un « noyau atomique ». Le dispositif est simple dans son principe. Un faisceau de rayonnement alpha, issu d'un échantillon de radium enfermé dans une boîte en plomb percée d'un trou, est dirigé vers une mince feuille d'or autour de laquelle est disposé un écran détecteur circulaire. Rutherford constate que l'essentiel du faisceau traverse la feuille d'or tout droit ou presque. Mais aussi qu'une fraction du rayonnement est sérieusement déviée. Difficile d'expliquer ces résultats en s'en tenant au modèle « plum-pudding » ! Rutherford estime que la charge positive des atomes doit être concentrée en leur centre : ce qui expliquerait pourquoi la plupart des particules alpha, chargées positivement, traversent la feuille d'or sans encombre alors que certaines, très minoritaires, sont déviées. Il propose en 1911 son modèle « nucléaire » : l'atome est selon lui constitué d'un minuscule noyau autour duquel gravitent les électrons, un peu comme les planètes autour du Soleil.

O. DARRIGOL

« Avec la théorie quantique, ou ondulatoire, les orbites électroniques disparaissent au profit d'une notion bien plus abstraite de "nuages de probabilité de présence" d'électrons »

Olivier Darrigol, historien des sciences, université de Paris

Après la découverte du proton, en 1919, le « démontage » de l'atome se poursuit

L'atome de Rutherford est surtout… plein de vide. Moins de deux ans plus tard, le physicien danois Niels Bohr (1885-1962) lui fera faire ses premiers pas dans l'ère… quantique. Dans son modèle, les électrons tournent en effet autour du noyau sur des orbites déterminées, correspondant à des « niveaux d'énergie » : les électrons sautent de l'une à l'autre en absorbant ou émettant de l'énergie. Mais déjà se profile une nouvelle mécanique de l'atome, dite quantique ou ondulatoire. Publiées dans les années 1925-1926, les théories de Werner Heisenberg (1901-1976) et Erwin Schrödinger (1887-1961) ne font plus tourner les électrons autour du noyau. *« Les orbites électroniques disparaissent au profit d'une notion bien plus abstraite de "nuages de probabilité de présence" d'électrons »,* explique Olivier Darrigol. Difficile, pour le commun des mortels, de se représenter désormais l'atome !

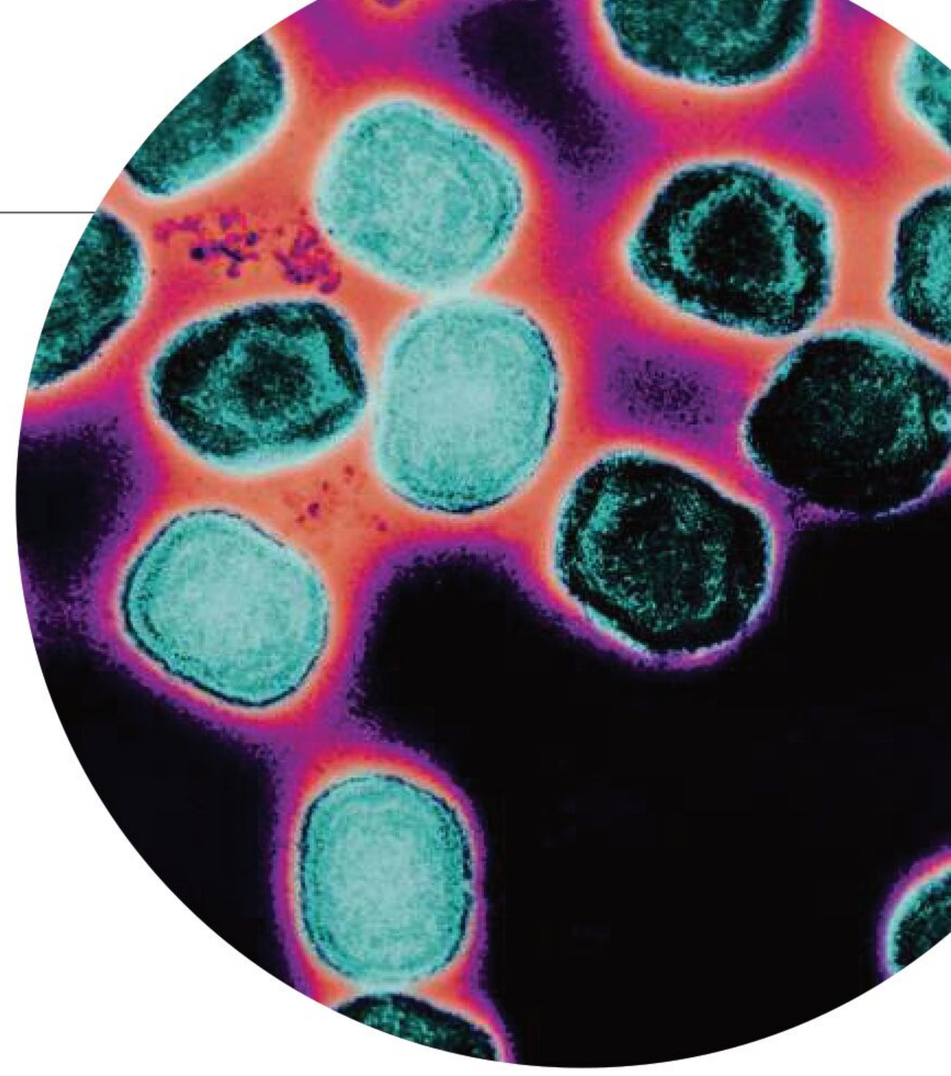
Après la découverte du proton en 1919 par Rutherford, le démontage de l'atome se poursuit : son assistant, James Chadwick, découvre le neutron en 1932. Tout un bestiaire de particules est progressivement mis au jour : neutrino, positron, lepton μ, méson, pion… Enfin, les pièces détachées de l'atome sont à leur tour disséquées. En 1964, le physicien états-unien Murray Gell-Mann (1929-2019) postule l'existence des quarks, constituants des protons et des neutrons, qui est confirmée en 1969 par son compatriote Richard Feynman (1918-1988).

L'atome paraît de nos jours presque à portée de main. Car on peut littéralement le « voir » depuis l'invention des microscopes à effet tunnel (1981) et à force atomique (1985)... et même le manipuler. Il a décidément bien changé ! Vingt-cinq siècles après l'intuition grecque, la science l'a cassé en mille morceaux, enfermé dans une forteresse d'équations, et rendu visible. Qu'en penserait Démocrite ?

PIERRE VANDEGINSTE

On accorde souvent à Pasteur la paternité du vaccin. À tort. Elle revient à l'Anglais Jenner qui, au XVIIIe siècle, reprit le principe de la « variolisation », importé de Turquie par une aristocrate.

La lady, la variole… et le premier vaccin



CDC/SGO / BSIP

Une technique éprouvée. Virus utilisé pour la préparation du vaccin antivariolique, observé au microscope électronique.

Si l'on entrevoit aujourd'hui une issue à la pandémie de Covid-19, c'est en grande partie grâce à… une aristocrate anglaise qui fit preuve d'audace et de bravoure, il y a trois siècles exactement. Printemps 1721 : une épidémie de variole s'abat sur le Royaume-Uni. Confinée dans sa maison de Twickenham, Mary Wortley Montagu suit avec inquiétude la propagation de la maladie. Elle-même a failli être emportée par cette *smallpox* – petite vérole – qui fait des ravages : le taux de mortalité grimpe à 20 %. Contre l'avis des experts, elle décide alors d'inoculer à sa fille, âgée de 3 ans, une petite quantité de pus tirée des pustules d'un malade.

SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

Pionnière. Lady Montagu importa la variolisation en Europe dès 1721.

Une technique – employée exclusivement par des femmes – qu'elle a observée quelques années auparavant dans l'Empire ottoman, où son mari était ambassadeur. « *Il y a un groupe de femmes âgées qui s'occupent d'effectuer l'opération chaque automne […] sur des milliers de personnes […] et il n'y a pas encore un seul cas de décès* », écrivait-elle alors à un ami depuis la Turquie. Cette inoculation variolique, pratiquée en Asie depuis des siècles afin de diminuer l'impact de l'infection par le virus de la variole (appartenant à la famille des *Poxviridae*), restait largement inconnue en Europe. Convaincue par des compatriotes qui s'étaient fait « varioliser » eux-mêmes, elle avait alors réalisé l'opération sur son fils. De retour en Angleterre, l'explosion épidémique la décide à répéter l'expérience sur sa fille, qui devient ainsi la première personne en Occident immunisée contre la variole. « *Je suis suffisamment patriote pour prendre le risque d'apporter cette invention salutaire en Angleterre* », affirme-t-elle sans hésitation. Dès lors, la variolisation se répand rapidement en Europe, y compris auprès de personnalités telles que les rois de Suède et du Danemark ou l'impératrice Catherine II de Russie.

Cette inoculation n'en reste pas moins risquée, avec un taux de mortalité d'environ 2 %, jusqu'aux expériences d'un médecin de campagne, Edward Jenner (1749-1823), soixante-quinze ans plus tard. Au cours de ses tournées, celui-ci constate que les jeunes fermières qui traient les vaches ne développent jamais la variole. Elles sont en revanche très souvent atteintes de vaccine, qui en est une forme moins sévère. En 1796, ayant lui-même été variolisé dans son enfance selon la technique importée par lady Montagu, il a l'idée d'inoculer au fils de son jardinier, par scarification, le pus prélevé sur la main d'une femme infectée par sa vache. Six semaines plus tard, il expose l'enfant au virus de la variole : celui-ci ne montre aucun symptôme, prouvant ainsi l'efficacité de la méthode de Jenner. Une expérience risquée, qu'on pourrait éviter aujourd'hui grâce à des protocoles bien plus sûrs et plus efficaces, mais qui a permis de donner naissance à la vaccination malgré les faibles connaissances de l'époque sur les micro-organismes. Louis Pasteur (1822-1895) perfectionnera le procédé, et prouvera qu'on peut atténuer l'effet d'un microbe en le cultivant et le laissant vieillir. Une série de découvertes qui ont permis d'éradiquer de nombreuses maladies… et pourraient nous sauver du coronavirus.

NICOLAS GUTIERREZ C.

CHANGEMENT DE REGARD

Si loin si proche. Ossements de Néandertaliens exhumés à La Chapelle-aux-Saints (1908) et La Ferrassie (1909). Lors de leur découverte, ils furent considérés comme les vestiges de Sapiens mal dégrossis.

JOHN READER/SPL/SUCRÉ SALÉ

NÉANDERTAL, UNE NOUVELLE HUMANITÉ

Panique chez les préhistoriens ! En 1856, de curieux ossements sont retrouvés dans la vallée allemande de Neander. Il faudra attendre plus d'un siècle, et le verdict de la génétique, pour accepter qu'ils appartiennent non pas à un Sapiens archaïque, mais à un *Homo*... différent.

Août 1856. Une équipe de carriers s'affaire à déblayer l'entrée de la grotte de Feldhofer, nichée dans la vallée de Neander, à une dizaine de kilomètres de Düsseldorf (Allemagne). Leurs efforts vont mettre au jour un fragment de crâne et des os. Probablement les restes d'un ours des cavernes, qu'ils confient donc à un naturaliste, Johann Carl Fuhlrott, enseignant dans la ville voisine. Pour lui, cependant, aucun doute : ces ossements ont appartenu à un type humain très ancien. Il décide de les montrer à un certain Hermann Schaaffhausen, professeur d'anthropologie à Bonn, qui les étudie consciencieusement. Son diagnostic tombe : le crâne provient d'une « race » humaine disparue – on s'exprime en ces termes, à l'époque. L'anthropologue mentionne d'abord l'idée d'une peuplade sauvage du nord-ouest de l'Europe, antérieure aux Celtes et aux Germains, puis qualifie les ossements de préhistoriques. En 1857, lors d'une réunion de la Société du Rhin inférieur pour l'histoire naturelle et la médecine à Bonn, il présente ses résultats.

De nombreux savants ne peuvent y croire ! L'anatomiste August Mayer attribue ainsi le crâne à un cosaque mort après avoir déserté l'armée russe en ●●●

Marylène Patou-Mathis, *Le Sauvage et le Préhistorique, miroir de l'homme occidental* Odile Jacob, 2011

Antoine Balzeau, Emmanuel Roudier (illustrations), *Qui était Néandertal ?* Belin, 2016

Documentaire : *À la découverte de Néandertal* http://sciav.fr/docneandertal

Conférence au musée de l'Homme : http://sciav.fr/confneandertal

●●● 1814, durant les guerres napoléoniennes. De son côté, le médecin pathologiste Rudolf Virchow ne voit dans ces ossements que les restes d'un homme moderne souffrant de malformations, rachitique, perclus de rhumatismes et simple d'esprit. D'autres encore les relient à un genre différent, proche du singe… Cette résistance pousse Fuhlrott à taire son opinion et conduit Schaaffhausen à tempérer la sienne, ce qui n'empêchera pas sa carrière d'en pâtir. Le débat scientifique durera plus de trente ans.

C'est que l'époque est à la révolution en matière de conception du temps. Depuis le XVII[e] siècle, l'idée s'est fait lentement jour que la Nature n'est pas cet objet créé par Dieu et inchangé depuis lors, mais qu'elle a une histoire. Les géologues en accumulent les preuves, reconstituant la formation des montagnes, étudiant les fossiles. Mais les récits d'origine religieux gouvernent encore de nombreux esprits.

En outre, pour une grande partie des savants de l'époque, même non croyants, accepter l'idée d'un ancêtre différent implique *a minima* la considération, sinon l'admission, de la théorie transformiste, selon laquelle le monde, et les êtres vivants qui l'habitent, évoluent. Apparue au début du XIX[e] siècle et portée par le naturaliste français Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829), cette pensée s'oppose au fixisme créationniste qui stipule que l'Univers est resté stable depuis sa création, soutenu par exemple par l'anatomiste français Georges Cuvier : lui qui a étudié des chats égyptiens momifiés depuis des milliers d'années ne voit pas de différence morphologique notable avec leurs descendants contemporains. Et Charles Darwin ne publiera son *Origine des espèces par la sélection naturelle,* véritable moteur de la révolution évolutionniste, qu'en 1859.

Paléogénomique. Un technicien de l'Institut Max-Planck de Leipzig (Allemagne) prépare un échantillon d'os afin d'en analyser l'ADN. Achevé en 2010, le séquençage du génome de Néandertal a permis d'établir définitivement sa place dans le buisson des humanités.

STEGER VOLKER/SPL/SUCRÉ SALÉ

Sciences archéologiques : la révolution permanente !

Âgée de deux cents ans à peine, l'archéologie, et par extension la paléoanthropologie, a vu récemment s'accélérer le rythme de ses découvertes, et ce grâce à une succession de révolutions techniques. Jusqu'aux années 1950, la pratique de cette discipline consistait essentiellement à associer les artefacts découverts pour former de grands concepts historiques et des « cultures archéologiques », comme celle du campaniforme, fondée sur les gobelets en céramique en forme de cloche trouvés dans des sépultures d'Europe et d'Afrique du Nord. Le développement dans les années 1950 de techniques de pointe, comme la datation au radiocarbone, ouvre alors la voie à une approche dite processuelle. Celle-ci privilégie la formulation d'hypothèses – confirmées ou infirmées par le recueil de données quantitatives, telles que l'âge d'un objet – et la construction de modèles permettant de mieux comprendre les processus d'évolution des sociétés humaines. Plus d'un demi-siècle plus tard, dans les années 2010, une nouvelle révolution s'opère, avec l'arrivée de la paléogénétique et de la paléoprotéomique, qui consistent à analyser de l'ADN et des protéines issus de vestiges fossilisés. Les données ainsi obtenues redessinent les cartes et remettent parfois en question des conclusions tirées il y a des décennies. En 2018, par exemple, des paléogénéticiens ont montré que la culture campaniforme s'était vraisemblablement répandue en Grande-Bretagne par des mouvements de populations, et non par le biais d'une simple diffusion culturelle des objets comme on le pensait auparavant. À l'image de son sujet d'étude, l'archéologie est donc une science évolutive.

Identifié avec certitude comme Sapiens, l'homme de Cro-Magnon crée la confusion

Mais voilà… le crâne de la vallée de Neander n'est plus seul. On se rend bientôt compte que d'autres fossiles, découverts des années plus tôt et alors passés inaperçus, partagent certaines de ses caractéristiques. C'est le cas d'un crâne d'enfant mis au jour en 1829 à Engis, en Belgique, et d'un autre, d'adulte, trouvé à Gibraltar en 1848. L'acceptation progressive des idées évolutionnistes les fait apparaître sous un nouveau jour. Et lorsqu'en 1863, le biologiste britannique Thomas Huxley compare les crânes d'Engis et de Feldhofer, cet ardent défenseur de la théorie évolutionniste – surnommé le « bouledogue de Darwin » – conclut qu'ils ont appartenu à un même

type humain, ancien et… inférieur. Un an plus tard, William King, paléontologue britannique, baptise enfin le spécimen. Il propose *Homo neanderthalensis,* en référence à la vallée dans laquelle il fut trouvé, défendant ainsi la théorie d'une espèce distincte.

Peu à peu, avec le bourgeonnement des idées darwiniennes, l'idée d'un humain ancestral fait son chemin, en particulier après la découverte retentissante, en 1886, d'ossements néandertaliens dans la grotte de Spy, en Belgique, ou encore d'un squelette presque complet à La Chapelle-aux-Saints, en France, en 1908. L'excellent état de ces fossiles offrira aux paléontologues un meilleur aperçu des caractéristiques anatomiques de Néandertal et contribuera à imposer, une fois pour toutes, son existence. Toutefois, quand, en 1868, des ouvriers exhument l'homme de Cro-Magnon en Dordogne, identifié sans hésitation comme Sapiens, une certaine confusion s'installe. En effet, les restes de Néandertaliens reposent généralement dans des couches stratigraphiques inférieures à celles dans lesquelles on trouve à cette époque les vestiges d'*Homo sapiens.* Cela conduit à penser que le premier a effectivement été l'ancêtre du second. Pire ! Jusque dans les années 1930, des erreurs seront commises dans certaines analyses : des fossiles de Sapiens étant classés comme Néandertaliens et inversement… *« Commence alors une grande quête,* explique Marylène Patou-Mathis, préhistorienne au Muséum national d'histoire naturelle. *Celle d'un chaînon manquant entre le singe et l'homme* (lire l'encadré p. 54)*, un hybride conduisant de l'animal à notre stade plus "avancé". Si certains parlent d'anthropopithèques ou de pithécanthropes, de nombreux regards se tournent vers l'homme de Néandertal. »*

BERNARD MARTINEZ

« Dans les années 1930 commence une grande quête, celle du chaînon manquant entre le singe et l'homme. De nombreux regards se tournent alors vers Néandertal »

Marylène Patou-Mathis, préhistorienne au Muséum national d'histoire naturelle

Ballotté dans l'histoire évolutive jusqu'à la fin du XXe siècle

Mais qui est-il ? En 1911, le paléontologue et géologue français Marcellin Boule dresse de lui un portrait peu flatteur, accentuant ce caractère primitif qui lui collera aux os pendant des décennies. Il le dépeint voûté, avec des membres postérieurs fléchis et une colonne vertébrale courbe. Le rapport d'étude anatomique est très précis et détaillé, mais son auteur est imprégné d'un paradigme qui conditionne ses réflexions : à l'époque, on conçoit l'évolution comme un processus linéaire, conduisant du « moins bien » vers le « meilleur ». Cette conception s'inscrit dans un contexte colonialiste, l'Occidental divisant l'humanité en « races » distinctes dont certaines sont considérées comme inférieures à d'autres – celles-là mêmes auxquelles on commence à attribuer des caractéristiques anatomiques néandertaliennes… *« Cette vision linéaire est obsolète*, rappelle Marylène Patou-Mathis. *Nous privilégions aujourd'hui une approche buissonnante de l'évolution, tant au niveau biologique que culturel. »* Ainsi, les espèces anciennes et disparues ont pu coexister, comme Sapiens et son cousin… Une idée qui, elle aussi, mettra du temps à s'implanter.

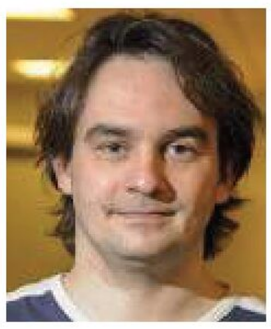
Néandertal sera ballotté dans l'histoire évolutive jusqu'à la fin du XXe siècle. Dans les années 1960, des généticiens comme l'Américain Theodosius Dobzhansky remettront même en cause son statut de membre d'une espèce à part entière, le ●●●

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #8

Inversion sexuelle

La nature emprunte parfois des voies impénétrables. L'Ig Nobel 2017 de biologie a consacré la démonstration de l'inversion des sexes chez les insectes cavernicoles du genre Neotrogla au Brésil. Les quatre auteurs de l'étude publiée dans la revue *Current Biology* ont découvert que dans ces grottes, pour se reproduire, les femelles chevauchent les mâles, enfonçant leur gynosome, un membre érectile s'apparentant à un pénis, dans la chambre génitale de ces derniers, semblable à un vagin. Cette inversion pourrait s'expliquer par l'environnement pauvre en nutriments des cavernes. Comme les mâles délivrent leurs gamètes dans des capsules riches en protéines, le gynosome des femelles leur permettrait de drainer les spermatozoïdes vers leur propre spermathèque tout en faisant le plein d'énergie. **F. F.**

●●● désignant comme une sous-espèce d'*Homo sapiens*. Il faudra attendre 2006, et le lancement du programme de séquençage du génome d'*Homo neanderthalensis* par l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutive de Leipzig, en Allemagne, pour être fixé quant à sa place dans le buisson des humanités. Lorsque les résultats sont publiés, quatre ans plus tard, une onde de choc secoue la communauté scientifique. On découvre jusqu'à 4 % d'ADN néandertalien dans le génome de certains humains modernes hors d'Afrique. Aujourd'hui, on sait de notre cousin disparu il y a quelque 35 000 ans qu'il taillait des outils performants, pratiquait des rites funéraires et avait développé une pensée symbolique. Il aura donc fallu plus d'un siècle et demi pour que l'humanité s'éveille à la pluralité des espèces de son genre et transforme sa perception de sa propre place dans le monde. Une véritable révolution !



BAPTISTE FENOUIL/REA

« Chaque époque a son prisme, et nous faisons, aujourd'hui encore, de la transposition et de la comparaison culturelle. Il revient à chaque scientifique de ne pas reproduire ces erreurs passées »

Antoine Balzeau, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle

Une réalité que les préconstruits idéologiques de l'époque empêchaient d'accepter

« *Quand l'homme de Néandertal est découvert, les sciences archéologiques en sont encore à leurs balbutiements,* précise Antoine Balzeau, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle. *À l'époque, les découvertes sont souvent fortuites, et faites par des amateurs.* » Des passionnés dont le travail n'est pas dépourvu de qualité scientifique. Leur approche, très descriptive, est similaire à celle des naturalistes des XVII[e] et XVIII[e] siècles.

Le débat ouvert par la découverte d'*Homo neanderthalensis*, puis de l'homme de Cro-Magnon, va considérablement contribuer à structurer l'archéologie comme discipline. Elle se libère de la dictature des opinions au profit d'un modèle basé sur des hypothèses, des théories, et les preuves qui les confirment ou les démentent. Il signe aussi la naissance de la paléoanthropologie. Depuis Néandertal, d'autres représentants du genre humain ont été découverts : *erectus* en 1891, *habilis* en 1960, *floresiensis* en 2003, *luzonensis* en 2019 ; et bien d'autres… Chacun éclairant un peu plus la profonde histoire des hommes.

« *Mais le travail est loin d'être terminé !* souligne Marylène Patou-Mathis. *Une partie des biais qui altéraient l'approche des archéologues du XX[e] siècle joue encore aujourd'hui.* » Pour la préhistorienne, il faut, pour les déconstruire, se concentrer sur les informations que livrent les vestiges grâce aux techniques modernes : analyses d'ADN ancien, paléoprotéomique, analyses biogéochimiques, datation au carbone 14, à l'uranium-thorium, etc. « *Notre attitude comparative et notre narcissisme évolutif nous poussent à penser, presque inconsciemment, la supériorité de notre espèce* », déplore la chercheuse. La découverte de Néandertal montrait déjà ce phénomène, il y a 165 ans. L'observation du squelette, simple et factuelle, révélait une réalité que les préconstruits idéologiques de l'époque empêchaient d'accepter. « *Chaque époque a son prisme*, ajoute Antoine Balzeau. *Aujourd'hui encore, nous faisons de la transposition et de la comparaison culturelle, et il revient à chaque scientifique de s'efforcer de ne pas reproduire ces erreurs passées.* »

Par un heureux hasard, la vallée de Neander a été nommée d'après le pasteur et poète allemand du XVII[e] siècle Joachim Neumann, qui avait hellénisé son propre nom de famille, lequel signifie « homme nouveau ». Le mois d'août 1856 signait bel et bien la découverte d'un homme nouveau, une autre humanité qui allait changer le regard que nous portons sur la nôtre.

WILLIAM ROWE-PIRRA

Toumaï, premier humain ?

La quête du chaînon manquant entre l'homme et le singe est aussi vieille que la théorie de l'évolution ! Elle donna naissance à quelques idées fantaisistes, comme celle du philosophe et biologiste allemand Ernst Haeckel qui pensait dans les années 1870 que cet intermédiaire avait vécu sur le continent disparu de Lemuria, dans l'océan Indien, et que le genre humain avait vu le jour en Asie.

Mais elle a surtout été marquée, en 2001, par la découverte d'un crâne fossile dans le désert du Djourab, au Tchad. Surnommé Toumaï par Michel Brunet, de l'université de Poitiers, et son équipe franco-tchadienne, ce vestige a appartenu à l'espèce *Sahelanthropus tchadensis*, vieille de 7 millions d'années. Celle-ci marquerait l'origine de la lignée humaine, et sa divergence d'avec celle des chimpanzés. Toutefois, une étude publiée en décembre 2020 par Roberto Macchiarelli – lui aussi de l'université de Poitiers – et son équipe dans le *Journal of Human Evolution* réexaminait la morphologie d'un fémur découvert avec le crâne. Ses auteurs remettaient en cause la bipédie du spécimen et rapprochaient davantage Toumaï du singe que de l'homme… Si la nature du débat peut sembler familière, la majorité des paléoanthropologues estiment toutefois que la bipédie de Toumaï est scientifiquement indiscutable.

Entre singe et homme. Mis au jour au Tchad en 2001, Toumaï a vécu il y a 7 millions d'années.

PHOTO PHILIPPE PLAILLY, RECONSTITUTION ELISABETH DAYNES / LOOKATSCIENCES

CAHIER

DÉCOUVRIR, un art collectif

Les génies solitaires ? L'histoire des sciences les renvoie aux oubliettes ! Car derrière toute découverte, il n'y a pas un homme enfermé seul dans son laboratoire, mais une culture qui a permis l'éclosion d'une pensée nouvelle, des discussions animées, des controverses parfois ardentes, toujours fécondes. Et souvent… des femmes.

Fructueuses disputes ..... p. 56

Invisibilisées ! ..... p. 58

L'esprit d'équipe ..... p. 60

SYLVIE CATELLIN :

« On ne peut planifier la recherche, pas plus que l'art ou la littérature » ..... p. 61

PUBLIC DOMAIN/ PHOTOGRAPH BY BENJAMIN COUPRIE, INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY, BRUSSELS, BELGIUM

Les participants au congrès Solvay de 1927, à Bruxelles. Cette conférence, organisée grâce au mécénat de l'industriel belge Ernest Solvay, rassembla les plus grands scientifiques de l'époque, dont les discussions permirent des avancées décisives en mécanique quantique. On reconnaît notamment, au premier rang, Marie Curie et Albert Einstein.

FRUCTUEUSES DISPUTES

Comment les idées nouvelles finissent-elles par s'imposer ? Par le débat ! Des discussions parfois vives, surtout lorsqu'elles opposent des savants passionnés et renversent des paradigmes bien établis. Mais toujours argumentées, s'appuyant sur les mesures et les expériences. Exemples avec trois controverses célèbres de l'histoire des sciences.

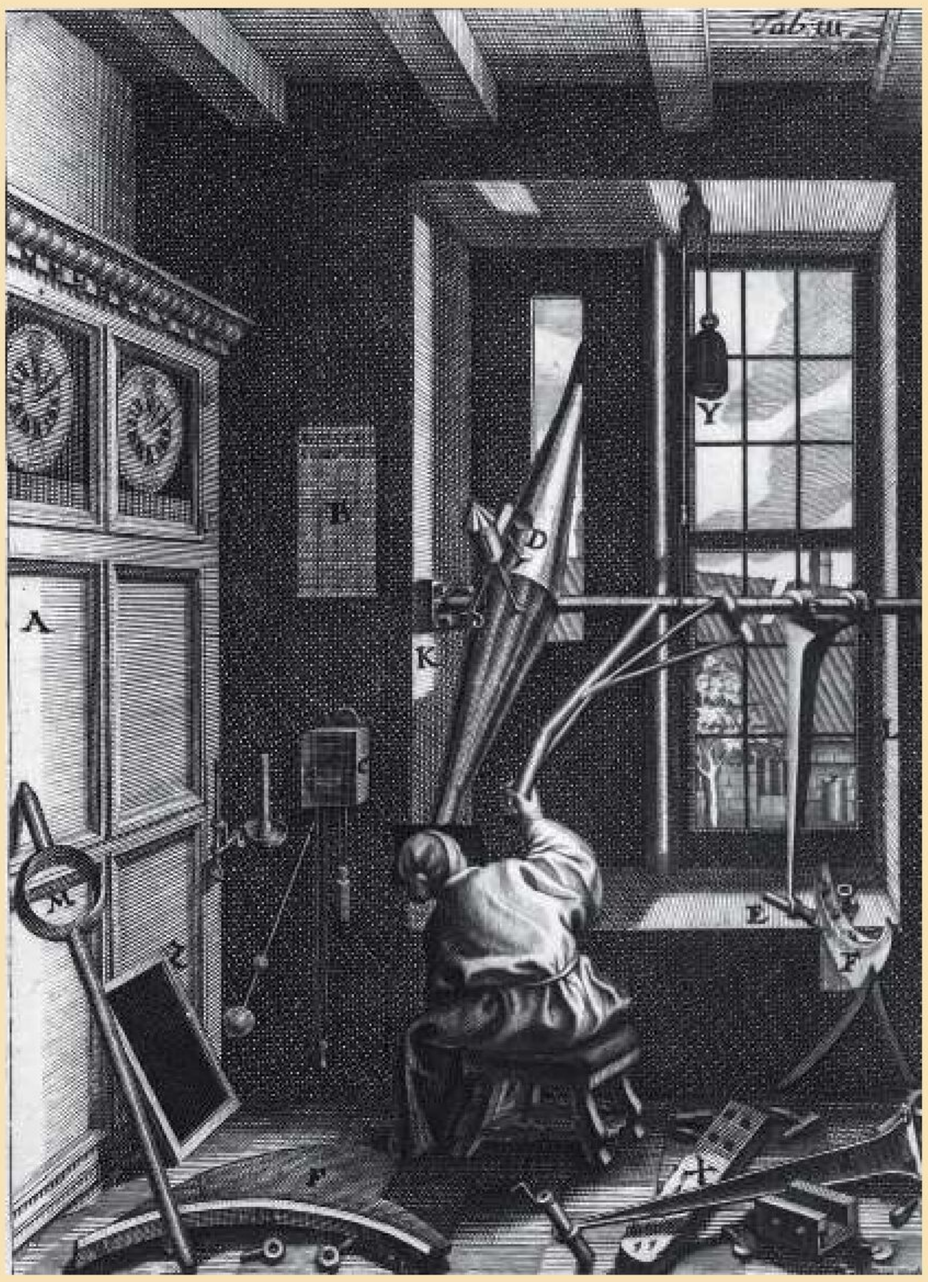
DESCARTES-RÖMER

La lumière, instantanée ou de vitesse finie ?

C'est un duel à distance… parcourue à la vitesse de la lumière. D'un côté René Descartes (1596-1650). Il pense, comme il l'écrit en 1634 à Isaac Beeckman, autre grand esprit de l'époque, que *« la lumière parvient instantanément du corps lumineux à notre œil »*. Descartes teste son hypothèse sur les éclipses de Lune. Si la lumière met une heure pour parcourir la distance Lune-Terre, un observateur terrestre détectera le début de l'éclipse une heure après les prévisions. Or aucun écart n'est mesuré. Il en conclut que la vitesse de la lumière est infinie.

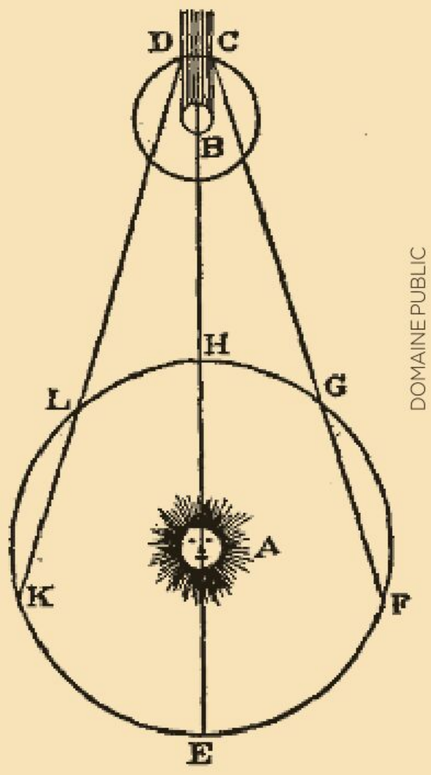
Face à Descartes, une série de géants : Galilée, Römer et Huygens. Galilée (1564-1642) entend résoudre la question des horloges des marins. Ceux-ci calculent en effet leur longitude en notant le décalage horaire entre le moment du passage du Soleil au Sud (midi vrai) et une horloge réglée sur l'heure du méridien de Greenwich. Or les horloges embarquées se dérèglent vite, avec les conséquences que l'on imagine pour la navigation. Il a donc l'idée d'utiliser les éclipses de Io, la petite lune de Jupiter qu'il a repérée quelques années auparavant, à la fois brèves et nombreuses. Problème : les éclipses se produisent parfois plus tôt, parfois plus tard que prévu par les lois du mouvement des planètes élaborées par Kepler. C'est à l'Observatoire de Paris, en 1676, que le Danois Öle Römer fait le lien entre la distance – variable – entre la Terre et Jupiter, et le décalage de temps des éclipses de Io. L'éclipse se produit plus tard que prévu quand Jupiter est loin de la Terre, et plus tôt quand la géante gazeuse est proche. La lumière ne se propage donc pas instantanément. Il estime qu'elle parcourt une distance égale au diamètre de l'orbite terrestre en 22 minutes (les calculs donnent aujourd'hui 16 min 38 s). Mais il ne calcule pas cette vitesse, car la mesure des distances dans le Système solaire est encore très imprécise.

Le débat faire alors rage. Jean-Dominique Cassini (1625-1712) prend d'abord parti pour Römer avant de se rétracter : « *On n'est pas certain que cette inégalité de temps ne soit pas produite ou par l'excentricité du satellite, ou par l'irrégularité de son mouvement, ou par quelqu'autre cause jusques ici inconnue.* » Ayant lu la traduction anglaise du traité de Römer, le Hollandais Christiaan Huygens donne, de son côté, une valeur dans son *Traité de la lumière* lu à l'Académie des sciences en 1678 et publié en 1690 : *« La vitesse de la lumière est plus de six cent mille fois plus grande que celle du son* (soit 200 000 km/s, établie depuis à 299 792,458 km/s, *ndlr*), *ce qui pourtant est tout autre chose que d'être momentanée, puisqu'il y a la même différence que d'une chose finie à une infinie.* » La découverte de Römer ne fut universellement admise qu'en 1729 ! L'arme fatale fut la révélation de l'aberration des étoiles par James Bradley (1693-1762). Ce phénomène se traduit par le fait que la direction apparente d'une source lumineuse dépend de la vitesse de celui qui l'observe, comme la direction apparente des gouttes d'eau sur notre pare-brise dépend de la vitesse. Ses calculs sur l'aberration indiquèrent que la lumière a une vitesse finie, avoisinant les 295 000 km/s. Presque exact.



LEEMAGE/BRIDGEMAN

Grâce à l'observation des éclipses de Io, le Danois Öle Römer montra en 1676 que la vitesse de la lumière est finie.



DOMAINE PUBLIC

Diagramme de 1676 représentant l'éclipse de Io (DC) par sa planète Jupiter (B), vue depuis différents points de l'orbite de la Terre autour du Soleil.

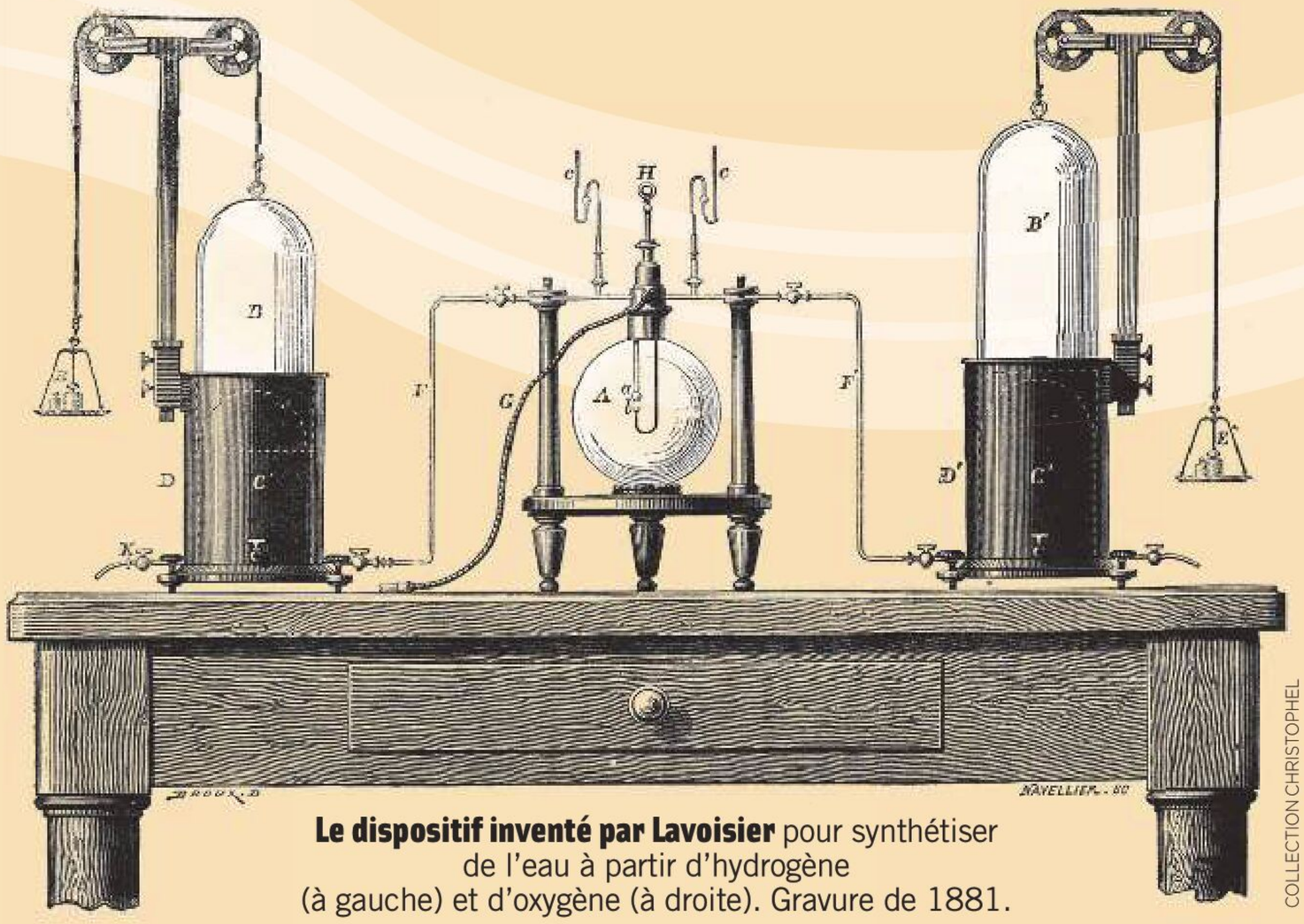
STAHL-LAVOISIER

Feu le phlogistique

Au XVIIIe siècle, le Bavarois Georg Ernst Stahl est un chimiste renommé dans toute l'Europe. Il a élaboré un système qui s'appuie sur l'eau, la terre, l'air et le feu, les éléments de base énoncés par Empédocle au Ve siècle avant notre ère, auxquels Aristote a ajouté la quintessence, ou éther. Selon Stahl, la chaleur et la lumière émises par un matériau lors de sa combustion tiennent à son phlogistique, *« un élément invisible, caché et impossible à isoler car toujours combiné »*, rappelle l'historienne Bernadette Bensaude-Vincent. Ce phlogistique a un poids. C'est pourquoi le résidu de combustion est souvent plus léger que l'original. Le charbon, formé de pur phlogistique, ne disparaît-il pas complètement en brûlant ?

Les Britanniques Joseph Priestley, en 1772, et Henry Cavendish, en 1776, décomposent l'air en deux éléments, que le Français Antoine Lavoisier nommera plus tard oxygène (« qui génère de l'acide ») et hydrogène (« qui génère de l'eau »)… et intègrent le phlogistique à leurs explications. De même, Louis-Bernard Guyton de Morveau, constatant que le résultat de la calcination du plomb et de l'étain pèse plus lourd, avance que le phlogistique pourrait aussi avoir un poids négatif. Mais Lavoisier commence peu à peu à douter de la théorie de Stahl… Il mesure, il pèse sans cesse. Dans un pli cacheté remis à l'Académie des sciences en 1772, il explique que *« le soufre, en brûlant, loin de perdre son poids, en acquiert […] »*. Il ajoute que lors de la réduction de la litharge (oxyde de plomb), un volume mille fois plus important d'air s'en dégage. Dans les dix ans qui suivent, il peaufine sa théorie : la source de chaleur n'est plus le phlogistique, mais la réaction chimique elle-même.

Pour faire adopter ses concepts, il crée en 1787, avec des chimistes qu'il a convertis, une nomenclature éloignée des termes ésotériques des alchimistes, qui appelaient « tête de mort » le chapiteau d'un alambic ou « terre damnée » le résidu d'une distillation. Et pour mieux diffuser ses travaux, il édite une nouvelle revue, les *Annales de chimie*. Son *Traité élémentaire de chimie*, publié deux ans plus tard, ne conservera rien des principes des quatre éléments. Selon lui, lors d'une réaction chimique, la masse des réactifs est égale à la masse des produits. Y compris les composants de l'air… auquel les phlogisticiens n'attribuaient aucun rôle. Ce que Lavoisier traduit par *« rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications »*. Bref, comme l'avait suggéré Anaxagore au Ve siècle avant notre ère, *« rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau »*. On a retenu une phrase plus simple : *« Rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme. »* Y compris les théories scientifiques.



Le dispositif inventé par Lavoisier pour synthétiser de l'eau à partir d'hydrogène (à gauche) et d'oxygène (à droite). Gravure de 1881.

COLLECTION CHRISTOPHEL

PASTEUR-POUCHET

La vie vient de la vie

7 avril 1864. Dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne à Paris, tout le gratin scientifique du Second Empire se presse pour assister à la lutte finale entre deux conceptions de l'origine de la vie. Félix-Archimède Pouchet (1800-1872) défend la génération spontanée depuis plusieurs années. Selon lui, les matières inertes peuvent produire de petits organismes vivants. Il en veut pour preuve ses expériences dans des cuves à mercure, où des animalcules apparaissent après quelque temps. Louis Pasteur (1822-1895) est sceptique. Ses travaux sur les fermentations l'ont persuadé que les germes n'apparaissent pas en l'absence de parents et proviennent souvent d'une contamination extérieure. Le combat ultime à la Sorbonne a été négocié entre les deux parties. Pouchet a récusé les commissions de l'Académie des sciences, qu'il juge trop favorables à Pasteur. Mais, reconnaissant la qualité des expériences de ce dernier, il accepte que celui-ci fasse la démonstration de sa théorie en public. Pasteur a préparé deux ballons en verre, l'un à col-de-cygne simple, l'autre à col-de-cygne doublement recourbé. Dans les deux, il a fait bouillir de l'eau et l'a laissée refroidir. Il explique que dans le premier, des *« germes qui flottent dans l'air »* se développent rapidement, alors que le second peut rester inaltéré *« quelques années »*. Et ajoute qu'il va prouver ses dires : s'il agite fortement le deuxième ballon et laisse l'air entrer au contact de l'eau – ce qu'il fait devant l'auditoire –, les germes s'y développent aussitôt. Il montre ainsi que c'est l'air rempli de germes qui féconde le liquide. Les germes ne peuvent apparaître spontanément. Selon lui, dans l'expérience de Pouchet, le mercure utilisé pour isoler le liquide est recouvert de poussières porteuses de germes. Ce sont ces derniers qui ont proliféré : ils ne sont pas apparus spontanément. Beau joueur, Pouchet reconnaît la validité de la démonstration et s'avoue vaincu. Ce que l'Académie des sciences ratifie aussitôt.

Louis Pasteur

BRITISH LIBRARY/KHARBINE-TAPABOR.

Spécialiste de physique nucléaire, la Sino-Américaine Chien-Shiung Wu se vit refuser le prix Nobel, attribué aux physiciens Tsung-Dao Lee et Chen Ning Yang pour une théorie qu'elle avait pourtant démontrée expérimentalement.

SMITHSONIAN INSTITUTION/SCIENCE PHOTO LIBRARY/AKG IMAGES

INVISIBILISÉES !

« *L'esprit n'a point de sexe* », affirmait le philosophe Poullain de la Barre (1647-1723), ardent défenseur de la cause féminine. Et pourtant, les femmes ont été sciemment et systématiquement éclipsées de l'histoire des sciences. Cette exclusion les a non seulement privées des honneurs qui leur revenaient, mais surtout empêchées de vivre de leur art et de leur savoir, limitant leur participation à l'avancée des connaissances.

Épouse, sœur, élève ou collaboratrice, la plupart des femmes scientifiques retenues par l'histoire sont assujetties au nom d'un homme. La mention de leur contribution est facultative, sans que l'on cherche ou que l'on puisse en déterminer la part. Comment évaluer précisément le mérite de **Marie-Anne Lavoisier** (1758-1836) dans la révolution scientifique attribuée à son époux ? Ses traductions éclairées des essais des chimistes britanniques, dont Richard Kirwan, ont pourtant permis de réfuter la théorie du phlogistique *(lire aussi p. 57)*, et d'énoncer les thèses révolutionnaires du *Traité élémentaire de chimie*, ouvrage majeur dont elle a, par ailleurs, dessiné toutes les gravures. L'histoire des sciences a revêtu l'œuvre des femmes savantes d'un manteau d'oubli et de moquerie. Cette invisibilisation, pouvant aller jusqu'à l'usurpation, a été théorisée par l'historienne Margaret Rossiter sous le nom d'« effet Matilda », hommage à la suffragette américaine Matilda Joslyn Gage (1826-1898) qui avait remarqué que malgré le rôle joué par les femmes dans l'histoire des technologies, le crédit et la valeur de leur ouvrage leur a toujours été retiré, volé, nié. Dès l'Antiquité, le sort réservé à **Hypatie** (370-415), professeure de mathématiques, d'astronomie, de physique et de philosophie à Alexandrie, qui périt lynchée et brûlée, a valu comme avertissement à ne pas outrepasser les limites d'un domaine réservé.

Le « harem » de Pickering

Mais les femmes sont utiles, et leur patience et leur ténacité peuvent être mises à profit ; le « harem » de l'astronome Edward Pickering à l'observatoire de Harvard en est une parfaite illustration. Au tournant du XX^e^ siècle, les femmes n'étant pas autorisées à se servir de télescopes, il leur confie les tâches ingrates : analyser les plaques photographiques, effectuer les calculs. Parmi ces fiables « petites mains », **Williamina Fleming** (1857-1911), **Annie Jump Cannon** (1863-1941), **Antonia Maury** (1866-1952) et **Henrietta Swan Leavitt** (1868-1921) réalisent des découvertes, sur les étoiles variables notamment, qui vont modifier l'image que l'on se faisait de l'Univers. Elles peineront cependant à gagner la reconnaissance des sociétés scientifiques.

La misogynie académique est à l'origine de bien des omissions. La Britannique **Cecilia Payne-Gaposchkin** (1900-1979), qui intègre Harvard en 1923, en subit précisément les effets. Elle y rédige, en deux ans seulement, une brillante thèse de doctorat dans laquelle elle démontre que les étoiles sont essentiellement composées d'hélium et d'hydrogène. Invité à la relire, le professeur Henry Russell dissuade l'étudiante de défendre cette théorie qui

AKG IMAGES

L'astronome Annie Jump Cannon

contredit la doctrine de l'époque (on croit alors que la Terre et les étoiles ont la même composition) avant d'arriver lui-même à cette conclusion quatre ans plus tard, par une voie différente. Lorsqu'il publie ses propres résultats en 1929, il cite les travaux de sa consœur, sans préciser qu'il les a rejetés au départ ; cette découverte lui est ainsi souvent attribuée. Faut-il y voir la raison de la modestie qui caractérisa Cecilia Payne-Gaposchkin tout au long de sa carrière, elle qui évoque dans ses mémoires l'élévation intellectuelle comme seule récompense de ses recherches ?

Étudiante donc invisible

De la modestie au renoncement, il n'y a qu'un pas, que **Jocelyn Bell Burnell** (née en 1943) a franchi alors qu'elle était encore étudiante en astrophysique à Cambridge. S'entêtant à analyser un signal récurrent inconnu malgré l'absence d'encouragements de son directeur de recherche, elle découvre en 1967 le premier pulsar, reste d'étoile issu d'une supernova. C'est pourtant son professeur, Anthony Hewish, qui reçoit le prix Nobel en 1974, avec son collaborateur Martin Ryle. Cette attribution suscite une controverse dans la communauté scientifique, certains défendant ardemment la chercheuse, d'autres estimant au contraire qu'elle n'a pas à être citée car elle n'aurait pas compris l'ampleur de sa découverte. En 2012, Jocelyn Bell Burnell expliquera que deux facteurs la rendaient alors invisible et vulnérable : elle était jeune mère et étudiante à une époque où l'on considérait que les chercheurs en début de carrière se contentaient d'exécuter les ordres de leur patron. C'est aussi par le silence que réagit la physicienne chinoise **Chien-Shiung Wu** (1912-1997), recrutée par les États-Unis durant la Seconde Guerre mondiale pour participer au Manhattan Project (le programme de bombe atomique), lorsqu'elle est écartée du Nobel en 1957. En l'attribuant à deux de ses compatriotes pour leur travail invalidant la loi de conservation de la parité, le comité oublie que c'est elle qui l'a prouvé de manière expérimentale, en montrant que lors de sa désintégration, les particules provenant d'un atome radioactif de cobalt-60 sont émises de manière asymétrique.

Jocelyn Bell Burnell découvrit les pulsars alors qu'elle était encore étudiante. C'est son directeur de thèse qui recevra le Nobel en 1974.

DAILY HERALD ARCHIVE/SSPL/GETTY IMAGES

AKG IMAGES

L'astrophysicienne Cecilia Payne-Gaposchkin

Ne jamais s'avouer vaincue

La pédiatre française **Marthe Gautier** (née en 1925) est cependant la preuve qu'il est possible de justifier de ses droits… même si elle a dû attendre près de soixante ans pour les voir reconnus. En 1953, elle découvre la présence d'un chromosome surnuméraire chez certains patients atteints de syndromes malformatifs, dont le plus fréquent est la trisomie. Elle est alors chef de clinique à l'hôpital Trousseau à Paris, au sein de l'équipe du professeur Turpin, et revient des États-Unis où elle a appris de nouvelles techniques de culture cellulaire. Techniques que ne maîtrise pas Jérôme Lejeune, l'assistant de Turpin, à qui elle prête ses lamelles d'observation pour les faire photographier… et qui annonce la découverte de la trisomie 21 lors d'un séminaire au Canada, sans la mentionner. Il écrit sa thèse sur le sujet, puis reçoit plusieurs distinctions en même temps que son supérieur, tandis que Marthe Gautier se spécialise en cardiologie infantile. Blessée, et consciente qu'elle a été tenue à l'écart, elle a le sentiment d'être la « *découvreuse oubliée* ». Saisi en 2014, le Comité éthique de l'Inserm confirme sa contribution et rappelle que les découvertes sont désormais collectives et non plus individuelles.

L'honneur de la science est-il pour autant sauf, lorsque tant de talents et de vocations ont été gâchés ou sont restés secrets ? Bien au contraire. C'est pourquoi il faut continuer de rendre hommage à celles dont on connaît l'histoire, pour leur courage et leur obstination, telle **Sophie Brahe** (1556 ou 1559-1643), astronome, botaniste, physicienne et alchimiste, dont le frère Tycho a loué dans un poème l'« *invincible esprit* ».

GAUTIER BARTOLI

La pédiatre Marthe Gautier

Nicolas Witkowski, *Trop belles pour le Nobel. Les femmes et la science*, Seuil, 2005

Éric Sartori, *Histoire des femmes scientifiques de l'Antiquité au xx^e siècle*, Plon, 2006

L'ESPRIT D'ÉQUIPE

Archimède sort de son bain et s'écrie « eurêka » en découvrant les lois de l'hydrostatique : une légende amusante, qui a contribué, comme beaucoup d'autres, à un mythe scientifique, celui de l'illumination d'un génie solitaire. La réalité est pourtant bien différente. Une découverte émerge le plus souvent dans un contexte scientifique favorable, au sein d'une communauté active. Einstein, Marie Curie, tout géniaux qu'ils furent, ont bénéficié du savoir et du savoir-faire de confrères et de prédécesseurs pour mener à bien leurs travaux. Quant à Penzias et Wilson, s'ils ont été les premiers à découvrir le rayonnement fossile du Big Bang, ce fut… par hasard.

LEEMAGE/BRIDGEMAN

Les époux Pierre et Marie Curie dans leur laboratoire.

Marie Curie et la radioactivité : une affaire de couple

Que sont ces mystérieux rayons, émanant d'un composé d'uranium, découverts par le Français Henri Becquerel en 1896 ? La jeune Marie Sklodowska, à la recherche d'un sujet pour sa thèse de chimie, a bien l'intention de le découvrir. Elle et le physicien Pierre Curie, qu'elle a épousé en 1895, forment un couple de chercheurs complémentaires : Pierre est l'expert en instruments de mesure, Marie la chimiste. Dans un atelier vétuste de l'École municipale de physique et de chimie industrielles de Paris, ils mettent au point une méthode de mesure quantitative du rayonnement. Marie comprend que celui-ci est d'origine atomique. Elle est la première à employer le terme de « radioactivité ». Le couple constate qu'il existe dans un minerai, la pechblende, d'autres éléments, sans doute très peu abondants, mais émettant un rayonnement bien supérieur à celui de l'uranium. Pour les extraire, ils se procurent du minerai, qu'ils traitent à la main dans un hangar… *« C'était un travail exténuant que de transporter les récipients, de transvaser les liquides et de remuer pendant des heures, au moyen d'une tige de fer, la matière en ébullition dans une bassine en fonte »,* écrit Marie dans le livre qu'elle consacre à Pierre Curie en 1924. La persévérance paie. En juillet 1898, ils annoncent la découverte du polonium puis, en décembre, celle du radium. Les travaux de Pierre et Marie Curie sont couronnés par le prix Nobel de physique, qu'ils partagent avec Henri Becquerel, en 1903. Après la disparition accidentelle de Pierre en 1906, Marie poursuit seule ses travaux. Elle recevra le prix Nobel de chimie en 1911 pour la découverte du polonium et du radium. Plus tard, à l'Institut du radium, achevé en 1914, Marie Curie aura pour assistante sa propre fille Irène qui, avec son époux Frédéric Joliot-Curie… recevra le prix Nobel de chimie en 1935 pour la découverte de la radioactivité artificielle. Chez les Curie, la science est bien une affaire de couples… et de famille.

SPL/AKG IMAGES

Arno Penzias et Robert Wilson ont découvert le fond diffus cosmologique.

Les veinards du Big Bang

Arno Penzias et Robert Wilson sont perplexes. En cette année 1964, les deux radioastronomes américains s'échinent à régler une antenne de 6 mètres avec laquelle ils souhaitent observer des sources radio dans le ciel. Ils ont analysé et éliminé toutes les sources parasites : émissions radio humaines, câblages défectueux dans l'instrument et même… nid de pigeons dans le cornet de l'antenne. Rien n'y fait : celle-ci continue à capter en permanence un faible signal, venu de toutes les directions de l'Univers. En 1965, Penzias confie ses difficultés à son confrère Bernard Burke. Celui-ci se souvient qu'une équipe de l'université de Princeton, menée par les cosmologistes Robert Dicke et James Peebles, travaille sur un modèle qui prévoit que 380 000 ans environ après le Big Bang, les noyaux atomiques et les électrons de l'Univers se sont assemblés pour former de la matière neutre, en émettant un rayonnement d'une longueur d'onde particulière. Penzias comprend alors l'origine du signal qu'il considérait comme parasite sur son antenne… Mis au courant, Dicke ne peut que constater qu'il a été devancé : Penzias et Wilson ont, par hasard, effectué une des découvertes les plus importantes du xx^{e} siècle : le rayonnement de fond cosmologique, « fossile » du Big Bang.

Quand Einstein prenait des cours de maths

HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM, ALBERT EINSTEIN ARCHIVES, COURTESY AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES

Einstein (à droite) a fait appel à son ami le mathématicien Grossmann.

En 1905, Albert Einstein publie la théorie de la relativité restreinte – qui montre qu'il n'y a plus d'espace ni de temps absolus – et l'équivalence masse-énergie, à l'œuvre notamment dans le phénomène de la radioactivité – le fameux $E=mc^2$. Il entend aller plus loin, en associant la relativité restreinte aux lois de la gravitation. Mais il n'y parvient pas ! En 1912, installé à Zurich (Suisse), il réalise qu'il ne pourra avancer dans ses travaux théoriques sans compétences supplémentaires en mathématiques. Il appelle donc à l'aide son ami, le mathématicien suisse Marcel Grossmann, qui va lui apprendre à utiliser une géométrie dite « riemanienne ». Celle-ci va lui permettre, à travers des équations complexes, de décrire un espace-temps courbe. Car dans la relativité générale, qui s'exerce à de très grandes échelles, la masse des corps (planètes, étoiles, galaxies) déforme l'espace. Et le chemin le plus court n'est pas la ligne droite, mais… une courbe, la géodésique.

Interview

SYLVIE CATELLIN

Maîtresse de conférences en sciences de l'information et de la communication, université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

« On ne peut planifier la recherche, pas plus que l'art ou la littérature »

COURTESY S. CATELLIN © E. MARCHADOUR

Alexander Fleming, dit-on, aurait découvert la pénicilline par hasard…
Dans un article publié dans le *New York Times* le 4 juillet 1949, Fleming affirme que *« les grandes découvertes ont été faites le plus souvent par des chercheurs libres de suivre les pistes que le hasard ou la chance leur ont fournies dans les laboratoires »*. Mais pour Fleming, l'accent mis sur le hasard sert avant tout à défendre l'espace de liberté des scientifiques, car on ne peut planifier la recherche fondamentale, pas plus qu'on ne peut programmer l'art ou la littérature… En réalité, le hasard ne suffit pas, il n'est que le point de départ. *« Le hasard ne favorise que les esprits préparés »*, a dit Pasteur. Sans la réceptivité, sans l'intérêt de Fleming pour les substances antibactériennes naturelles, il n'y aurait pas eu de sérendipité, pas de découverte.

Comment définir cette sérendipité ?
Ce néologisme a été formé par l'écrivain anglais Horace Walpole en 1754 à partir d'un conte oriental mettant en scène des princes de Serendip (ancien nom du Sri Lanka), auxquels il attribue la capacité d'associer imagination et raisonnement. Dans la vie courante, c'est la faculté de saisir et d'interpréter ce qui se présente à nous de manière inattendue. En science, l'art de découvrir en prêtant attention à ce qui surprend, en imaginant une interprétation pertinente avant de prouver celle-ci par la méthode scientifique. Ce raisonnement imaginatif est la seule forme de raisonnement qui puisse apporter de nouvelles connaissances, car il n'est pas seulement logique, mais requiert une bonne part de subjectivité.

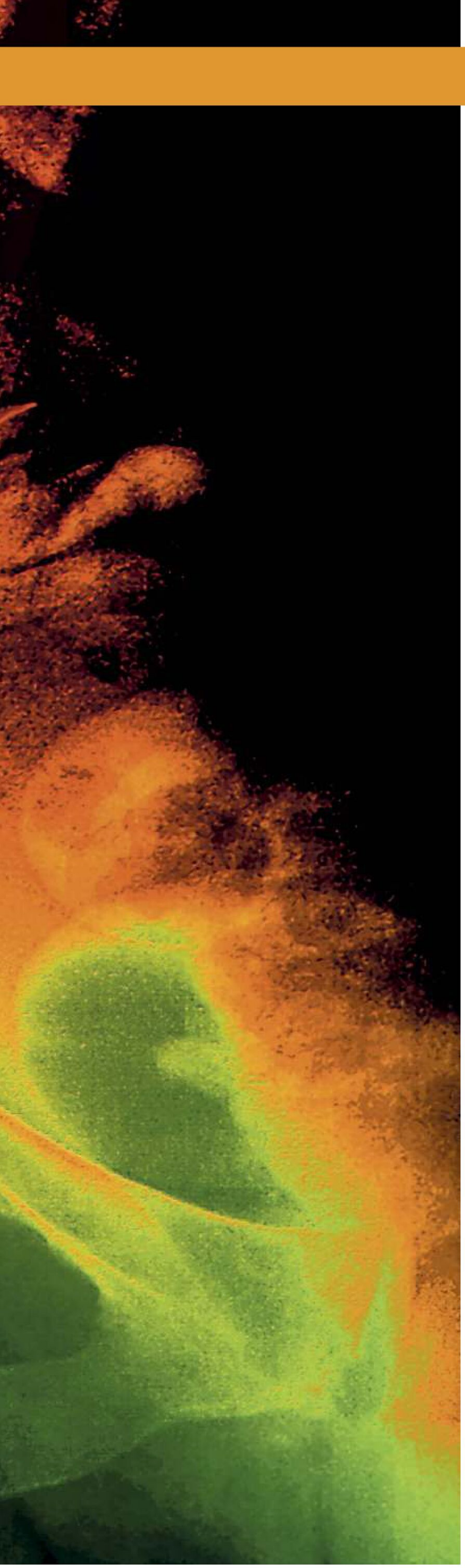
Est-ce cette part de subjectivité qui permet à la science d'innover ?
Être capable de se laisser surprendre implique de remettre en question les acquis, les présupposés théoriques ou les idées partagées par une communauté scientifique. Or l'histoire montre que pour réaliser des découvertes, il est indispensable de s'écarter de ce qui est déjà connu. La sérendipité permet de construire ce nouveau regard.

Fait-elle partie intégrante du processus de recherche ?
La découverte ne peut jamais surgir de la simple application d'une méthode. Elle implique une démarche d'enquête dont le cheminement même n'est pas prédéfini. Explorer des voies nouvelles ne peut se faire que dans la créativité et la sérendipité. Or les modes actuels de gestion de la recherche privilégient une recherche programmée, court-termiste, nuisible à la liberté et à la sérendipité.

Sylvie Catellin, *Sérendipité. Du conte au concept*, Seuil, 2014

PROPOS RECUEILLIS PAR SARA DE LACERDA

Os en couleurs. Cette radio colorisée montre une fracture du col du fémur. Les images radio sont habituellement en noir et blanc – la plaque étant constituée de bromure d'argent. Le contraste est lié à la différence d'absorption des rayons X par les « obstacles » plus ou moins denses qu'ils rencontrent : os, muscles, etc.



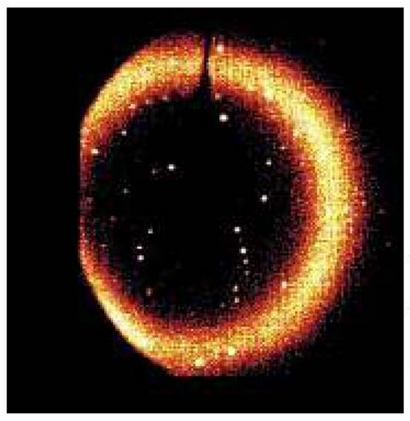
KULYK, MEHAU/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ

LE HASARD FAIT BIEN VOIR LES CHOSES

Une fluorescence inopinée qu'un physicien allemand, Röntgen, décide d'élucider… La découverte des rayons X, qui bouleversa la science, notamment la médecine, n'aurait pu avoir lieu sans une alliance de hasard et de sagacité.

Une lumière… invisible ? La découverte est sensationnelle ! L'une de ces révélations qui suscitent un même enthousiasme dans le milieu scientifique et le grand public. En cette fin de XIXe siècle, la mise en évidence des rayons X, puisque c'est d'elle qu'il s'agit, presque instantanément connue et relayée par la presse, bouleverse la physique. Et change la vision du monde, en donnant pour la première fois accès à des images internes de l'être humain… de son vivant. Mais comment cette radiation électromagnétique, d'une longueur d'onde comprise entre 0,01 et 10 nanomètres et dotée de l'étonnante propriété de pouvoir traverser la matière… a-t-elle pu être repérée ?

L'histoire débute durant la soirée du 8 novembre 1895, outre-Rhin, au cœur du royaume de Bavière. Ce jour-là, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), directeur de l'Institut de physique de l'université de Würzburg, profite d'un moment de tranquillité pour se livrer, seul dans son laboratoire, à quelques expériences personnelles d'électricité sur un « tube de Crookes ». Inventé par sir William Crookes (1832-1919) trois décennies plus tôt, le dispositif est fréquemment utilisé par les savants de l'époque pour étudier les décharges électriques – l'électron ne sera découvert qu'en 1897. Le tube est constitué de deux électrodes placées dans une ampoule ●●●



SPL/SUCRÉ SALÉ

Au cœur de la matière. La cristallographie aux rayons X permet de déterminer la structure moléculaire – ici, d'un échantillon d'ADN. Elle peut être utilisée dans le cadre de la mise au point de thérapies ciblées contre le cancer.

SPL/GETTY IMAGESW

Les os sans la peau. Après avoir soumis divers objets à ce nouveau rayonnement, Röntgen décide, le 22 décembre 1895, de « radiographier » la main de son épouse Anna Bertha. L'image fera le tour du monde.

●●● en verre où l'on a fait le vide. Lorsqu'on applique une forte tension électrique à ses bornes, on provoque une flamboyante ionisation de l'air résiduel enfermé et l'émission, depuis la cathode vers l'anode, de ce qu'on appelle à l'époque des « rayons cathodiques », autrement dit un flux d'électrons. Ces derniers peuvent être mis en évidence en tapissant la face interne du tube d'une matière fluorescente. Les électrons, en heurtant le verre, dessinent alors sur la paroi l'ombre projetée de l'anode « éclairée » par la cathode. Mais en cette fin de XIXe siècle, le phénomène, inexplicable sur la base des seules lois de l'électromagnétisme formulées par James Maxwell en 1870, est encore mal compris. Et les savants du monde entier rivalisent d'imagination pour essayer d'en préciser la nature.

Sans en être un spécialiste, Wilhelm Röntgen s'intéresse, lui aussi, à ce problème, réputé être l'un des rares à demeurer irrésolus en physique – nombre de scientifiques estiment alors que cette discipline peut rendre compte de la majorité des énigmes du monde qui les entoure ! Il plonge le laboratoire dans l'obscurité et met son tube de Crookes sous tension. Il remarque alors qu'une plaque photographique pourtant placée à plusieurs mètres du dispositif brille d'une lumière fluorescente. Röntgen décide de couvrir son appareil d'un carton noir et note avec stupéfaction que non seulement le phénomène persiste, mais que lorsqu'il intercale des objets entre le tube enveloppé et la plaque, des ombres apparaissent sur cette dernière. Papier, livre, feuille d'aluminium, métal, bois, verre… l'opacité des silhouettes varie selon la composition et l'épaisseur du matériau employé !

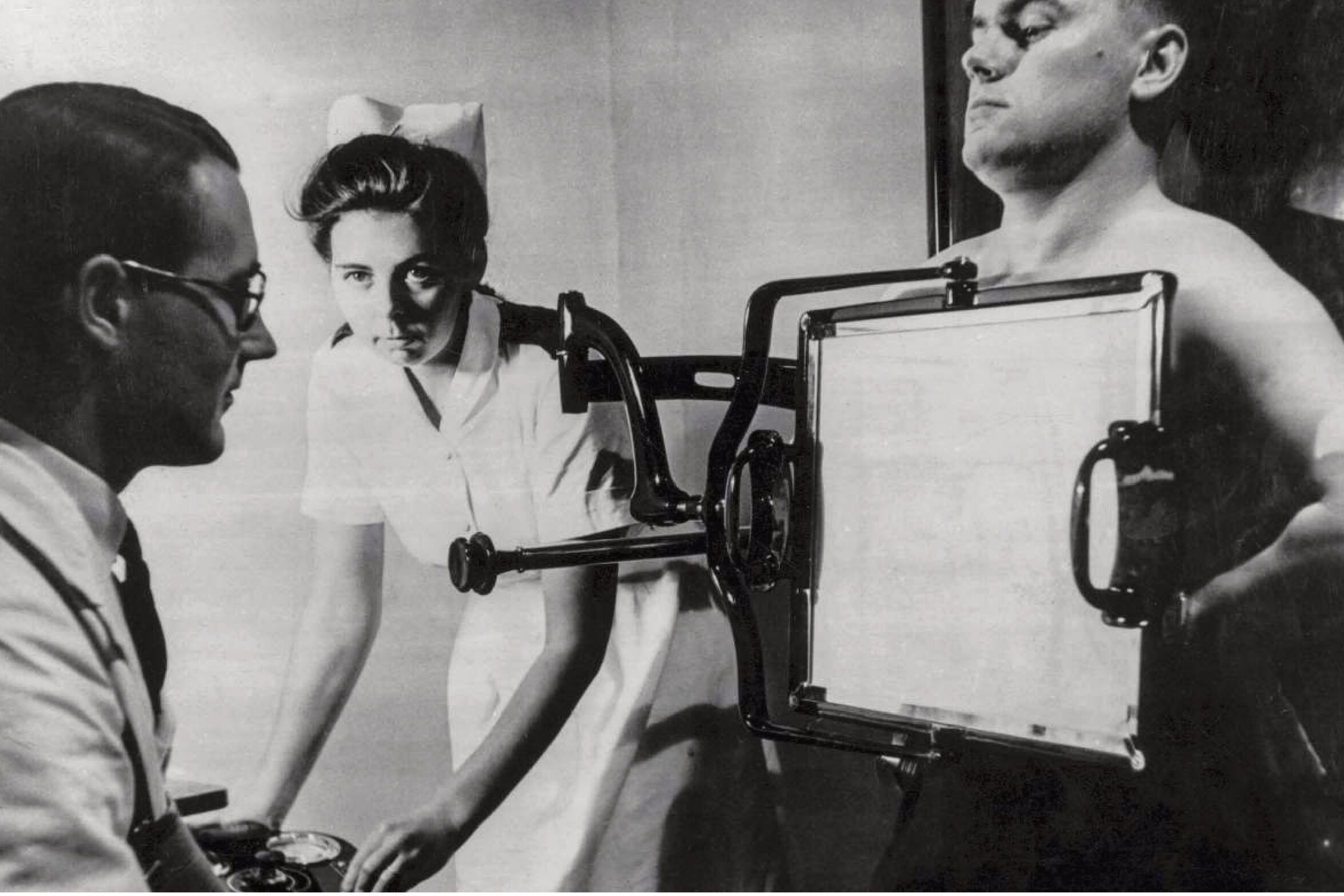
Pendant sept semaines, durant lesquelles il apparaît préoccupé et renfrogné, Röntgen se livre à d'autres expériences sur ce qui lui semble être un nouveau type de rayonnement, différent des rayons cathodiques. Il multiplie les « radiographies ». D'abord, une boussole et une série de poids placés dans une boîte en bois, puis un fil de fer enveloppé dans un tissu, divers liquides ; enfin la porte de son laboratoire, dont il réussit à capter les éléments métalliques internes et même la peinture au plomb. Le 22 décembre 1895, il franchit une étape décisive en plaçant la main de son épouse Anna Bertha sur la trajectoire des rayons. L'image produite fera le tour du monde : elle est la première de l'histoire à montrer le squelette d'un être vivant ! Six jours plus tard, Wilhelm Röntgen remet à la Société de physique médicale de Würzburg une communication sur cette *« nouvelle sorte de rayons »* qu'il nomme provisoirement « X », pour « inconnus ». Le 1er janvier 1896, il adresse des copies de ce manuscrit à divers savants de renom.

Becquerel découvre un second type de rayonnement invisible : la radioactivité

S'ensuit l'un des plus grands emballements de l'histoire des sciences. Le 5 janvier, la presse autrichienne est la première à rendre compte de la découverte. Avant la fin du mois, plusieurs laboratoires en Allemagne, au Royaume-Uni, en France et même aux États-Unis et au Japon, annoncent avoir réussi à leur tour à produire des radiographies, confirmant les affirmations de Röntgen, dont l'article est traduit et publié dans *Nature* le 23 janvier. Ce même jour, le savant tient, devant la Société de physique médicale de Würzburg, l'unique conférence qu'il consacrera au sujet. Devant le public stupéfait, il produit une seconde radiographie fameuse : celle de la main de l'anatomiste Albert von Kölliker, présent dans la salle… Par la suite, Röntgen livrera encore deux articles sur les rayons X, en mars 1896 et en mai 1897, établissant notamment que ces derniers

Exotiques sources cosmiques

Absorbés par l'atmosphère, les rayons X produits dans l'Univers ne sont pas détectables depuis la surface de la Terre. C'est pourquoi les astronomes n'apprendront leur existence qu'après les débuts de la conquête spatiale. En 1962, une fusée-sonde américaine équipée de compteurs Geiger mesure un puissant signal en provenance de la constellation du Scorpion. La découverte de Scorpius X-1, « première » source cosmique de rayons X, sera couronnée en 2002 par un prix Nobel de physique attribué à l'Italo-Américain Riccardo Giacconi (1931-2018). Constituée d'un couple d'étoiles dont l'une est dite à neutrons, cette binaire X à faible masse, comme la désignent les spécialistes, va donner naissance à une nouvelle discipline : l'astronomie en rayons X. XMM-Newton (Esa), Integral (Esa), Rossi X-ray Timing Explorer (Nasa), Swift (Nasa), Chandra (Nasa)… Depuis cette époque, le domaine s'est enrichi de toute une flottille de télescopes spatiaux permettant d'expliquer ces rayonnements. Ces derniers seraient produits par des objets suffisamment compacts pour être à même de porter des gaz jusqu'aux températures nécessaires à une telle émission – de l'ordre de plusieurs centaines de millions de degrés. Binaires X, bien sûr… mais également trous noirs, étoiles à neutrons et même nuages de gaz chauds intergalactiques… Des objets célestes qui comptent parmi les plus exotiques du Cosmos !



ROGER VIOLLET

Révolution médicale. La diffusion rapide de la radiologie a permis d'énormes progrès dans le diagnostic d'un grand nombre de maladies, malformations et fractures. Ici, une radio des poumons, réalisée en 1943 dans un hôpital anglais.

prennent naissance au point du tube frappé par les « rayons cathodiques ».

Mais cet expérimentateur, à qui sera remis en 1901 le premier prix Nobel de physique, cessera bientôt de travailler sur le sujet. Écrasé par le retentissement de sa découverte, cet homme discret et solitaire préférera laisser à d'autres le soin d'expliquer le phénomène… Et ces derniers sont nombreux à s'y essayer ! Ludwig Boltzmann, Lord Kelvin, George Stokes, Henri Poincaré… les plus illustres scientifiques de leur temps s'enthousiasment pour cette découverte jugée de premier plan. D'autant qu'elle va immédiatement en entraîner une autre. C'est en effet en apprenant l'existence des rayons X qu'Henri Becquerel (1852-1908) aura l'idée de comparer ces derniers à la fluorescence des sels d'uranium, aboutissant à la caractérisation, le 2 mars 1896, d'un second type de rayonnement invisible : la radioactivité.

« Ce fut surtout l'origine d'une longue controverse entre les physiciens, qui s'interrogent sur la nature de ces rayons X », explique René Guinebretière, professeur à l'Institut de recherche sur les céramiques (Ircer) du CNRS et de l'université de Limoges. Si ces derniers sont, comme le pense le physicien et chimiste britannique William Henry Bragg (1862-1942), constitués de corpuscules si petits qu'ils sont à même de se faufiler entre les atomes de la matière pour la traverser, alors il ne peut s'agir d'électrons. En effet, ces particules sont dotées d'une charge électrique négative. Or, il est bientôt démontré que les rayons X ne sont pas déviés par les champs électriques et magnétiques. *A contrario*, s'ils correspondent à des ondes de très haute fréquence, ce dont est convaincu son compatriote Joseph John Thomson (1856-1940), comment expliquer qu'on ne réussisse pas, comme on le fait avec de la lumière, à les combiner pour produire des franges sur un écran, un peu comme on le ferait en jetant simultanément deux cailloux dans l'eau tranquille d'un lac ?

Le débat ne sera tranché qu'en 1912 avec les travaux de Max von Laue (1879-1960). En parvenant à faire diffracter des rayons X par un cristal, ce dernier va définitivement démontrer la nature électromagnétique du phénomène. Et donner naissance à une nouvelle science expérimentale, la radiocristallographie, qui permet d'accéder (jusqu'à l'échelle des atomes) à la structure des matériaux cristallins, minéraux et organiques. Chimie, physique, biologie – ●●●

RENÉ GUINEBRETIÈRE

« Sa découverte fut à l'origine d'une longue controverse entre les physiciens, qui s'interrogent sur la nature des rayons X »

René Guinebretière, professeur à l'Institut de recherche sur les céramiques du CNRS et de l'université de Limoges

KING-HOLMS/SPL/SUCRÉ SALÉ

Techniques non invasives. Le scanner à rayons X et l'IRM permettent d'obtenir des vues 2D ou 3D de l'intérieur du corps. Ici, exploration des veines des membres inférieurs afin de déceler une thrombose.

●●● avec notamment la découverte de la structure de l'ADN en 1952 ou les études sur le Covid-19 –, de nombreuses disciplines recourent de nos jours à cette méthode à qui sont dédiées, depuis les années 1940, d'énormes installations baptisées sources à rayons X synchrotrons. La France en accueille deux: Soleil et European Synchrotron Radiation Facility, l'une à Orsay, l'autre à Grenoble.

Mais en ce début de XXe siècle, le public, peu concerné par ces controverses de haute volée, ne retient que la manifestation la plus impressionnante d'un phénomène plus ou moins associé dans son esprit à la mode en vogue du spiritisme. « *Certains commerçants de chaussures avisés n'hésitent pas à se faire de la publicité en proposant à leur clientèle de se radiographier le pied au moment de choisir une pointure*, raconte René Guinebretière. *Et les forains organisent des spectacles de "cinématoradiographie".* » Six jours après que Röntgen a radiographié la main de sa femme, un autre événement a en effet montré le monde sous un autre jour: la première séance de cinématographe ouverte au public par les frères Lumière.

Mais c'est du côté des médecins que l'intérêt est le plus prononcé. Car une partie d'entre eux a vite compris tout ce que pourrait apporter la radiologie à la chirurgie ou au diagnostic précoce de certaines maladies comme la tuberculose. C'est le cas notamment, à l'hôpital Tenon à Paris, d'Antoine Béclère (1856-1939). Créateur d'un des premiers laboratoires spécialisés, il fonde avec onze de ses collègues, en 1909, la Société de radiologie médicale de Paris. Durant la Grande Guerre, alors qu'il est directeur du service radiologique des Armées, il aide Marie Curie à concevoir ses fameuses « petites Curies », ces ambulances équipées d'appareils Röntgen acheminées au plus près du front pour l'examen des blessés. Ces derniers auraient été plus d'un million, dans les deux camps, à bénéficier des bienfaits du procédé. Dès lors, les rayons X vont rapidement trouver leur place à l'hôpital et contribuer à la mise au point de techniques d'imagerie médicale désormais indispensables, comme les scanners à rayons X qui réalisent des images en coupes tomographiques du corps des patients. Toujours à l'hôpital, la radiothérapie est devenue un procédé incontournable pour le traitement des cancers: elle peut détruire les cellules tumorales tout en épargnant les tissus sains.

La révélation des rayons X est souvent présentée comme un exemple de sérendipité, une découverte relevant d'un enchaînement de hasards *(lire aussi l'interview p. 61)*. De fait, on établira plus tard que Röntgen ne fut pas le premier à observer le phénomène. Son prix Nobel de physique lui vaudra ainsi le vif ressentiment de certains savants comme Philipp Lenard (1862-1947), qui avait fourni le dispositif ayant abouti à l'identification du rayonnement. Mais si d'autres avaient « vu » avant lui des rayons X, Röntgen fut bien le seul à leur accorder suffisamment d'importance pour les analyser et les étudier. Bien plus que la chance, c'est la sagacité et la perspicacité qui lui ont valu de rester dans l'histoire comme un bienfaiteur de l'humanité.

VAHÉ TER MINASSIAN

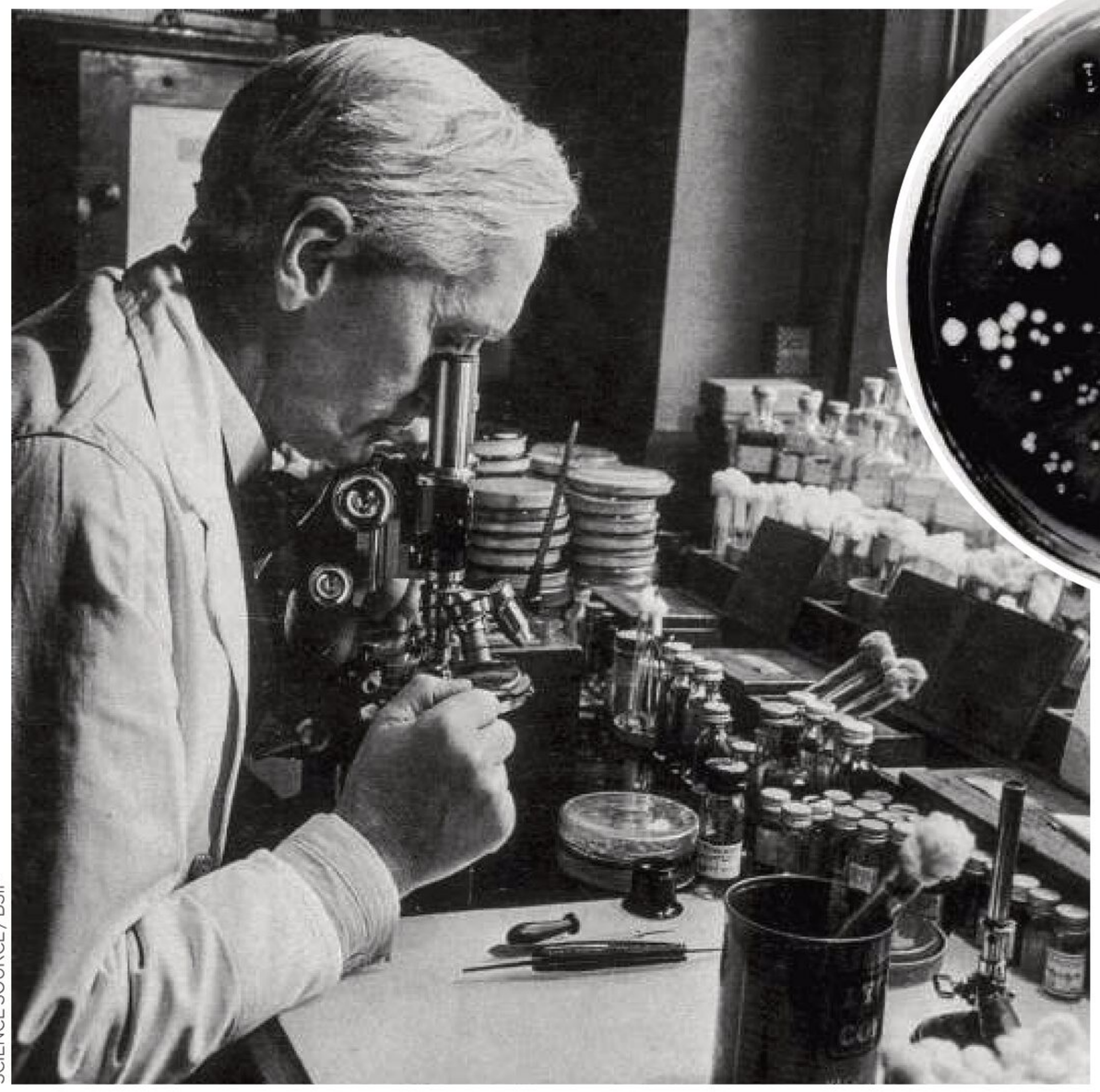
LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #9

L'erreur est humaine : quand les Ig Nobel saluent la loi de Murphy

En 2003, les Ig Nobel ont décerné le prix d'ingénierie à John Paul Stapp, Edward A. Murphy Jr. et George Nichols, pour avoir donné naissance en 1949 à la loi de Murphy. L'ingénieur Murphy, de l'U.S. Air Force, testait la tolérance du corps humain à la décélération avec un chariot sur rails propulsé par une fusée lorsque pendant l'un des tests, son assistant installa méthodiquement les instruments de mesure... à l'envers. L'ingénieur en tira ce principe fataliste : s'il y a une ou plusieurs manières de faire quelque chose, et qu'une de ces manières peut aboutir à une catastrophe, alors quelqu'un l'emploiera. La sentence passa à la postérité et trouva un large écho, que ce soit en matière de conception de dispositifs de sécurité ou de psychologie humaine. **F. F.**

En 1928, Alexander Fleming découvre par hasard cette moisissure capable d'éradiquer des pathogènes. Y serait-il parvenu s'il avait fait preuve d'un plus grand souci de propreté ?

Pénicilline : les bons côtés de la saleté



SCIENCE SOURCE / BSIP

ST MARY'S HOSPITAL MEDICAL SCHOOL/SPL/SUCRÉ SALÉ

Premier antibiotique. En 1928, Alexander Fleming (ici dans son laboratoire du St Mary's Hospital) observa la destruction d'une culture de staphylocoques par une simple moisissure.

Le 3 septembre 1928, de retour dans son laboratoire londonien après quelques semaines de vacances, Alexander Fleming trouve, sur un coin de paillasse, une boîte de culture pourrie. Boîte que tout chercheur sensé aurait jetée… Mais pas lui. Il décide d'y regarder de plus près. À l'époque, le médecin écossais s'intéresse à la bactérie *Staphylococcus aureus*, responsable, notamment, de pneumonies et de méningites. Avant de partir, il a mis en culture cette bactérie, dans le but de l'étudier à son retour. Or, en ce jour – capital pour la science – de septembre, il constate non seulement que l'une des boîtes a été contaminée par un champignon (de l'espèce *Penicillium rubens*), mais surtout que le staphylocoque ne s'est pas développé à proximité de la moisissure. *« Mon seul mérite est de ne pas avoir négligé cette observation et de l'avoir étudiée en tant que bactériologiste »,* expliquait-il avec modestie en recevant, en 1945, son prix Nobel pour cette découverte fondamentale. C'est précisément là que réside tout son génie ! Là où d'autres – y compris son assistant Merlin Pryce – n'auraient vu que de la pourriture, lui a suspecté un puissant tueur de bactéries. Une observation dont ses collègues bactériologistes n'ont pas su évaluer l'intérêt. Il faudra en effet attendre le début des années 1940, et la mise au point, par les chercheurs Howard Florey et Ernst Boris Chain (co-lauréats du Nobel avec Fleming), d'une méthode de production de la pénicilline à grande échelle, pour procéder à des essais cliniques.

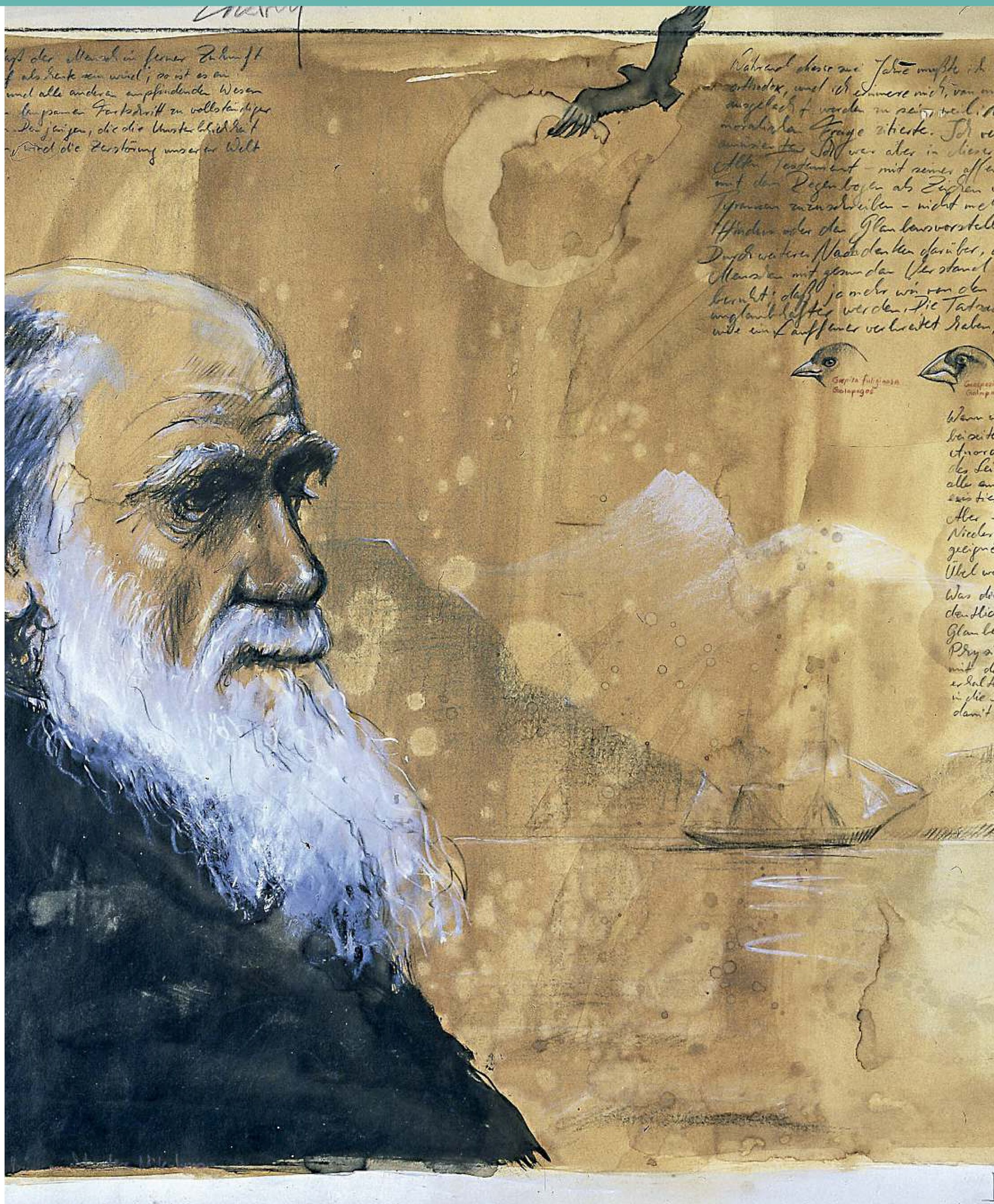
Là où d'autres n'auraient vu que de la pourriture, lui a suspecté un puissant tueur de bactéries. Une observation dont ses collègues bactériologistes n'ont pas su évaluer immédiatement l'intérêt.

Il aurait éternué sur l'une de ses boîtes de culture

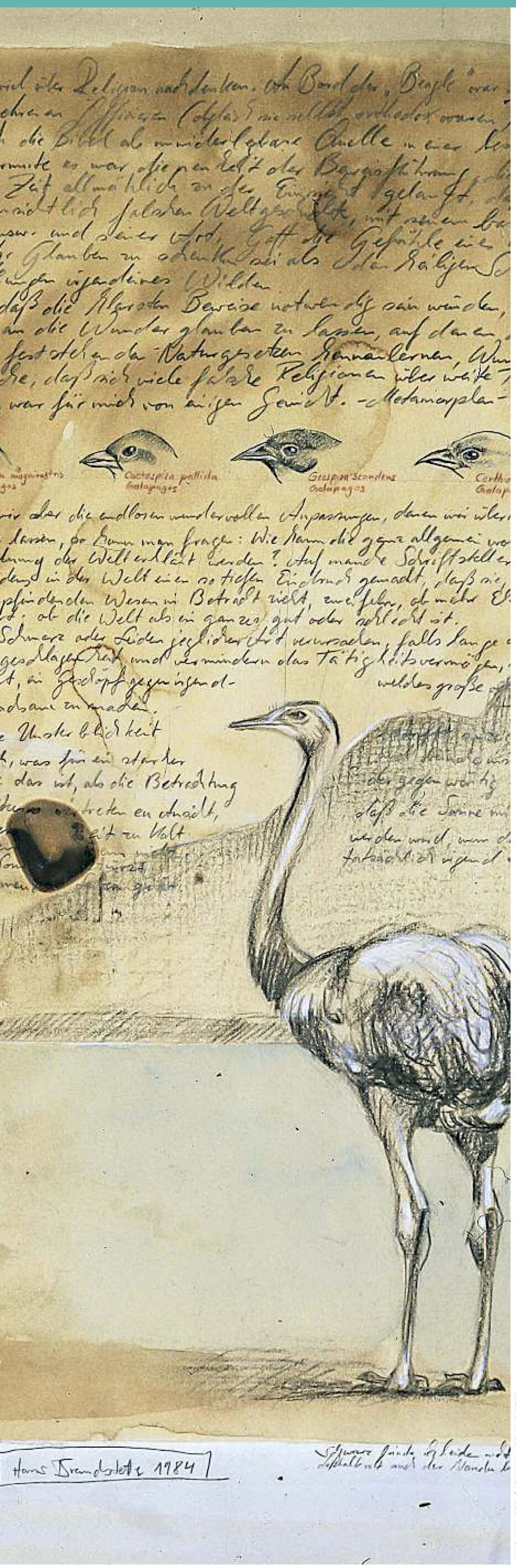
Le chercheur écossais n'en était pas à son coup d'essai. En 1921, alors qu'il cultivait – déjà – des bactéries dans son labo, il identifia l'enzyme bactéricide lysozyme, présente notamment dans les larmes. Comment ? Là encore, grâce à un mélange de hasard, d'observation, d'intuition et d'hygiène… douteuse. Atteint d'une rhinite, il aurait éternué sur l'une de ses boîtes de culture. Autour des sécrétions nasales expulsées, les bactéries finirent par disparaître. Se fiant à son intuition, il décida d'étudier le phénomène, allant jusqu'à faire pleurer ses étudiants – avec des citrons – pour étudier cette protéine, mettant en évidence un élément clé de notre immunité innée. Son étudiant V. D. Allison, raillé par Fleming pour sa manie de la propreté, avouera plus tard : *« S'il avait été aussi propre qu'il croyait que je l'étais, il n'aurait jamais fait ses deux grandes découvertes. »*

NICOLAS GUTIERREZ C.

EXPÉDITIONS SCIENTIFIQUES



Les voyages forment la jeunesse… surtout celle des naturalistes : dès les premières étapes du tour du monde qu'il effectua à bord du HMS Beagle, Darwin recueillit des matériaux qui allaient nourrir ses recherches sa vie durant. Illustration de Johann Brandstetter.



AKG-IMAGES / JOHANN BRANDSTE

LE VOYAGE INITIATIQUE DU JEUNE DARWIN

En 1831, à l'âge de 22 ans, un naturaliste anglais part pour un tour du monde. Il en rapportera des milliers de spécimens et de multiples observations sur la diversité du vivant qui lui permettront, vingt ans plus tard, d'élaborer une hypothèse révolutionnaire : la théorie de l'évolution.

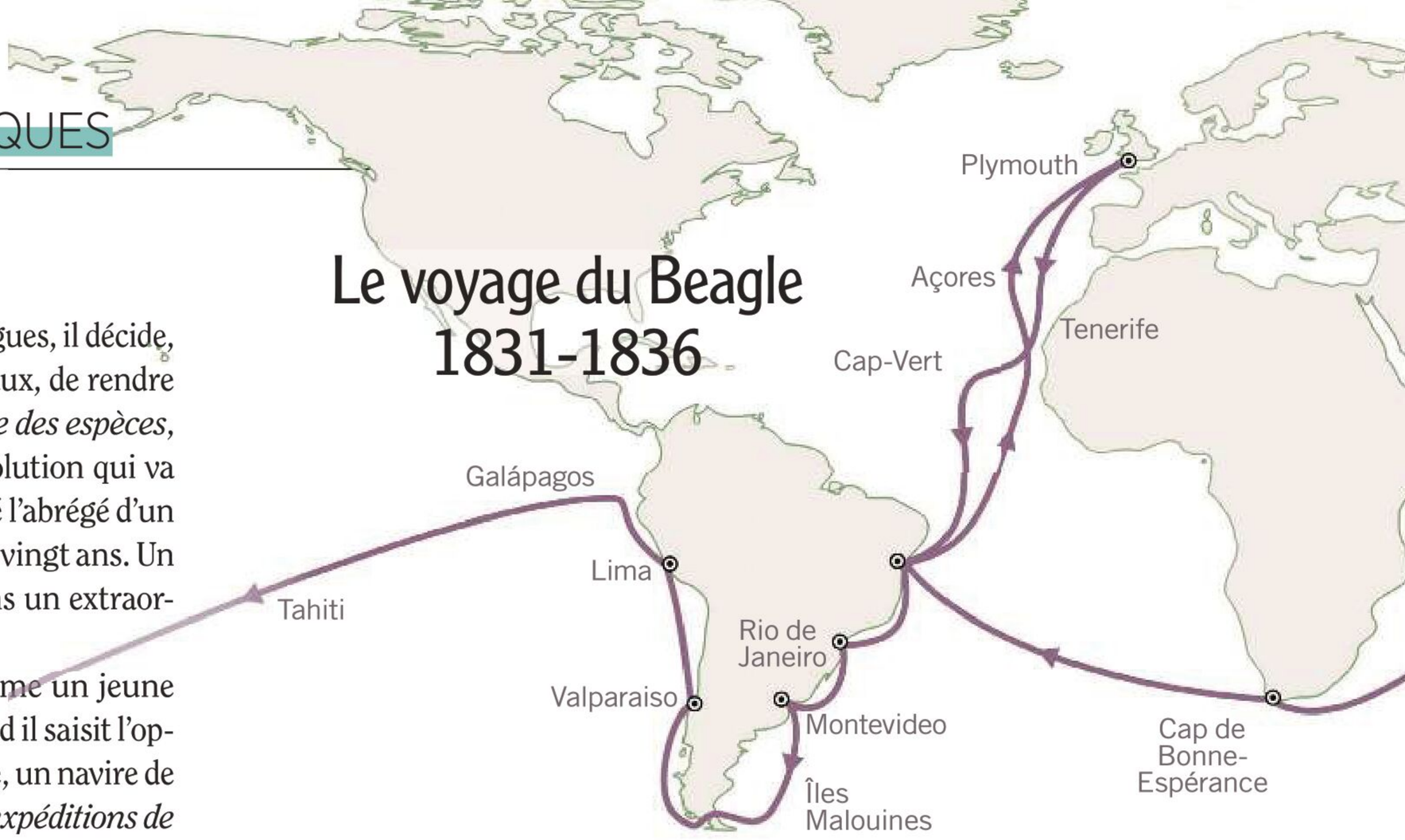
D*e l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie.* Le livre qui porte ce titre, publié à Londres le 24 novembre 1859, a été écrit d'une main fébrile, en quelques mois. Au moment où il a commencé à le rédiger, son auteur, Charles Darwin, est un naturaliste renommé âgé de cinquante ans. Il travaille tranquillement à un imposant ouvrage sur les espèces vivantes lorsqu'il reçoit une lettre d'Alfred Russell Wallace. Ce jeune homme, qui gagne sa vie en récoltant dans les pays tropicaux des spécimens destinés aux collectionneurs, lui fait part d'une intuition. *« Wallace a lu Malthus… Il a compris que la lutte pour la vie crée une pression de sélection »*, explique Thierry Hoquet, professeur de philosophie des sciences à l'université Paris Nanterre. L'économiste britannique Thomas Malthus (1766-1834) était parti d'un constat simple : le nombre d'êtres humains augmente plus vite que les ressources disponibles, ce qui les conduit à la misère, voire à la famine. Wallace en déduit que dans un milieu donné, seuls les plus aptes survivent et se reproduisent.

Ce n'est qu'une intuition… Mais Darwin reconnaît là les idées sur lesquelles il travaille depuis ●●●

Charles Darwin, *L'Origine des espèces* (texte intégral de la 1re édition, traduction Thierry Hoquet), Seuil, 2013

Patrick Tort, *Darwin et la science de l'évolution*, Gallimard, 2000

Charles Darwin, *Le Voyage du Beagle* (édition illustrée), Delachaux et Niestlé, 2018



●●● des années. Pressé par ses collègues, il décide, pour prouver l'antériorité de ses travaux, de rendre public le système qu'il a bâti. *L'Origine des espèces*, pierre angulaire de la théorie de l'évolution qui va révolutionner la biologie, est en réalité l'abrégé d'un colossal travail de réflexion de près de vingt ans. Un travail qui n'aurait pu voir le jour sans un extraordinaire voyage initiatique.

En 1831, Charles Darwin est lui-même un jeune homme d'à peine vingt-deux ans quand il saisit l'opportunité de s'embarquer sur le Beagle, un navire de la Royal Navy. *« L'objectif premier des expéditions de l'époque est de rechercher de nouvelles terres, des ressources naturelles, des données géographiques utiles,* souligne Sarah Samadi, du Muséum national d'histoire naturelle à Paris. *Dans ce cadre, les naturalistes sont embarqués pour décrire les espèces inconnues. »* Ainsi, le Beagle part pour une campagne destinée en premier lieu à réaliser des relevés géographiques des côtes sud-américaines.

En Amérique du Sud, il s'enfonce dans les terres à la recherche d'espèces inconnues et de fossiles

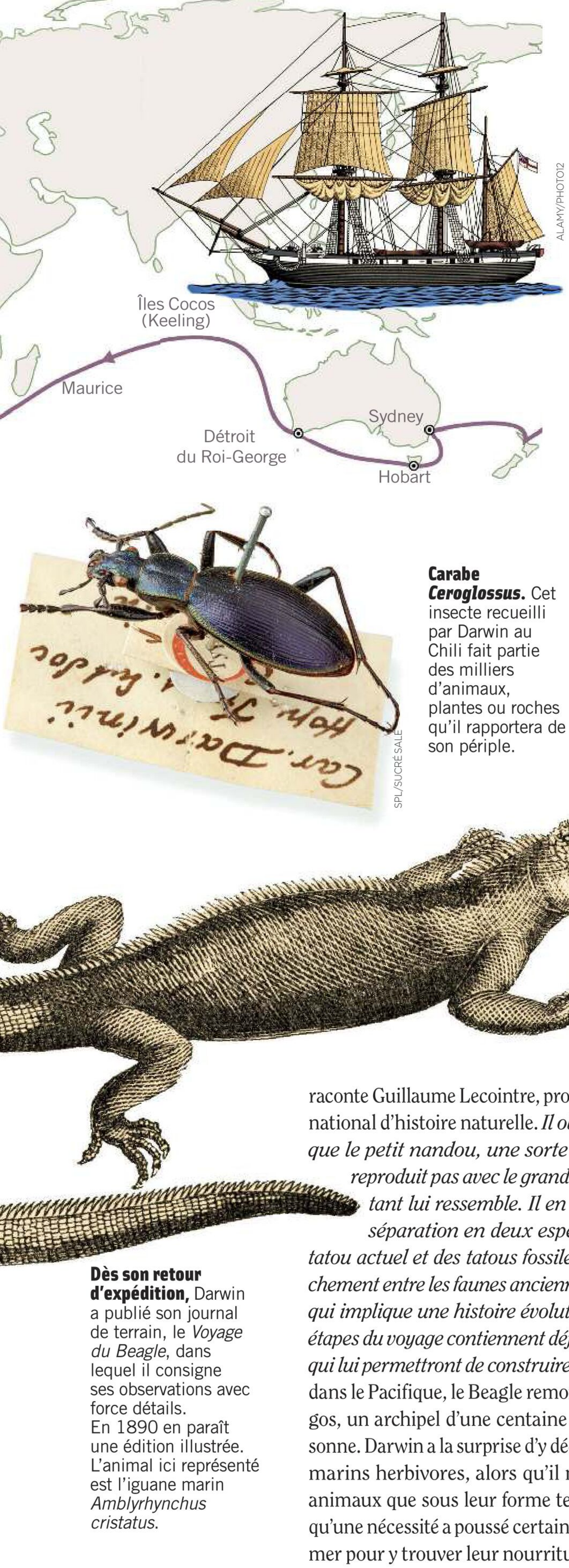
Né dans une famille éduquée, le jeune Darwin a appris l'histoire naturelle, la médecine, mais aussi la théologie, car il est croyant. À cette époque, sciences et religion font encore bon ménage et le « fixisme » prévaut : les espèces, créées par Dieu, sont immuables. Jusqu'au XVIIIe siècle, la première motivation des naturalistes est de révéler la profusion miraculeuse de la Création. C'est ainsi que le Suédois Carl von Linné (1707-1778) classe des milliers d'espèces animales et végétales. Mais à l'époque de Darwin, les choses ont déjà commencé à changer. Pour Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829), les espèces se complexifient sans cesse et se transforment selon leur mode de vie. C'est le « transformisme ». Exemple resté célèbre : le cou de la girafe, qui s'allonge pour atteindre les feuilles les plus hautes des arbres… Ces idées ont largement circulé en Europe, alimentant de vifs débats entre « fixistes » et « transformistes » *(lire aussi p. 50-54)*. Darwin considère peu les travaux de Lamarck et cherche à s'en démarquer. *« La théorie de Lamarck donne un pouvoir à la volonté, au désir de l'être vivant. Mais elle ne dit rien sur le véritable mécanisme de la transformation »,* explique Thierry Hoquet. Le Britannique a lu également les travaux de son compatriote, le géologue Charles Lyell (1797-1875). À rebours des thèses du moment, portées notamment par le paléontologue français Georges Cuvier, qui considèrent que la géologie de la Terre mais aussi l'apparition ou la disparition des espèces

SPL/SUCRÉ SALÉ

Dans l'archipel des Galápagos, Darwin a collecté des pinsons de treize espèces différentes. L'ornithologue John Gould, à qui il les enverra à son retour de voyage, les identifiera comme appartenant à un seul et même groupe, malgré les formes et tailles dissemblables de leurs becs.

sont le fruit de « catastrophes », celui-ci fait l'hypothèse de changements graduels sur des temps très longs. Darwin a aussi observé comment les éleveurs sélectionnent des races d'animaux domestiques à partir de certaines variations apparues de manière fortuite et qui sont ensuite perpétuées dans le temps. Il s'interroge enfin sur la distribution géographique de la diversité des espèces et sur leurs similarités d'un continent à l'autre. Pour avoir le cœur net sur ce dernier point, une seule solution : explorer le monde. *« Darwin a construit sa théorie sur la base de l'exploration et de la démarche scientifique qu'elle sous-tend,* rappelle Sarah Samadi. *On part d'hypothèses, souvent peu étayées, et l'on va collecter des observations dans des régions du monde très éloignées les unes des autres. C'est ce que Lyell avait réalisé en géologie. »*

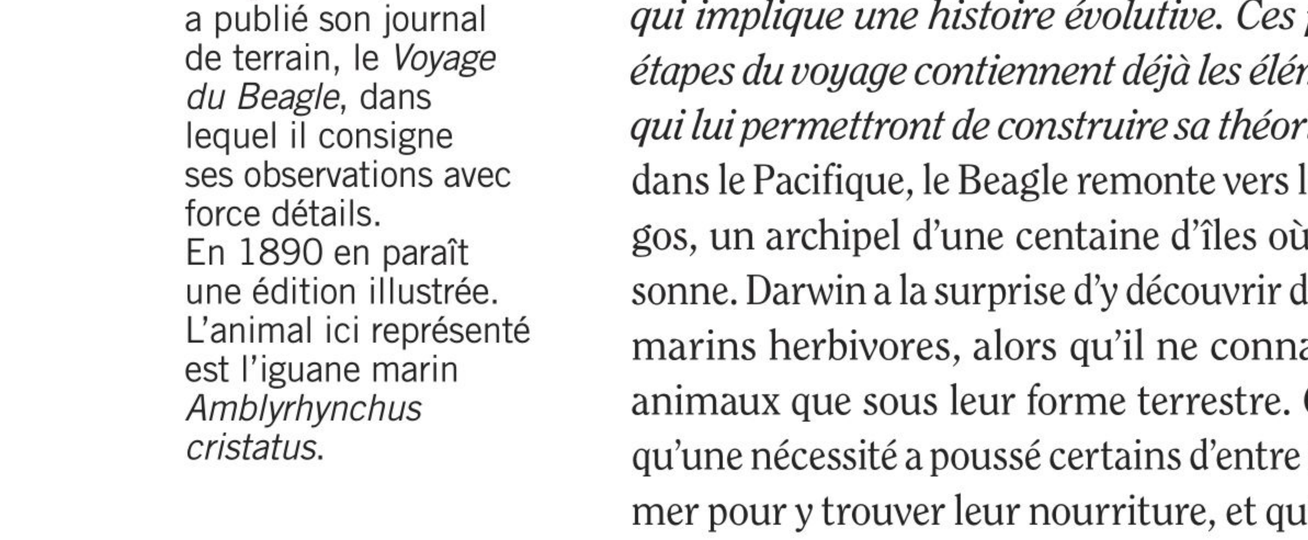
Le Beagle appareille le 27 décembre 1831, cap sur l'Amérique du Sud. Il accostera au Brésil puis en Argentine. Darwin s'enfonce dans les terres à la recherche d'espèces inconnues mais aussi de fossiles. *« Il consigne ses observations dans des carnets,*



ALAMY/PHOTO12

SPL/SUCRÉ SALÉ

Carabe *Ceroglossus*. Cet insecte recueilli par Darwin au Chili fait partie des milliers d'animaux, plantes ou roches qu'il rapportera de son périple.



AKG IMAGES

Dès son retour d'expédition, Darwin a publié son journal de terrain, le *Voyage du Beagle*, dans lequel il consigne ses observations avec force détails. En 1890 en paraît une édition illustrée. L'animal ici représenté est l'iguane marin *Amblyrhynchus cristatus*.

raconte Guillaume Lecointre, professeur au Muséum national d'histoire naturelle. *Il observe notamment que le petit nandou, une sorte d'autruche, ne se reproduit pas avec le grand nandou, qui pourtant lui ressemble. Il en déduit qu'il y a eu séparation en deux espèces. Observant le tatou actuel et des tatous fossiles, il fait le rapprochement entre les faunes anciennes et modernes, ce qui implique une histoire évolutive. Ces premières étapes du voyage contiennent déjà les éléments-clés qui lui permettront de construire sa théorie.* » Entré dans le Pacifique, le Beagle remonte vers les Galápagos, un archipel d'une centaine d'îles où la vie foisonne. Darwin a la surprise d'y découvrir des iguanes marins herbivores, alors qu'il ne connaissait ces animaux que sous leur forme terrestre. C'est donc qu'une nécessité a poussé certains d'entre eux vers la mer pour y trouver leur nourriture, et qu'ils se sont accommodés à ce milieu… Le naturaliste observe également des pinsons dont la forme du bec diffère beaucoup selon les îles. Sur le moment, il ne leur prête que peu d'attention, comme en témoignent ses carnets. « *Ce n'est pas en les observant qu'il a découvert la théorie de l'évolution, comme le voudrait la légende,* explique Thierry Hoquet. *Il n'y a pas eu de moment "eurêka"! C'est beaucoup plus tard qu'on a évoqué les pinsons, notamment pour des raisons pédagogiques.* » Mais la découverte de nombreuses espèces aux Galápagos lui sera précieuse pour expliquer les processus qui conduisent à une telle diversité.

Dès 1842, la théorie est prête et il rédige un essai… qu'il ne publiera pas

Après avoir fait étape en Polynésie, en Australie, dans les îles de l'océan Indien, en Afrique du Sud, le Beagle retourne au Brésil avant de regagner finalement l'Angleterre, le 2 octobre 1836. Avec une riche moisson pour le naturaliste : des milliers d'échantillons. « *Darwin est plus théoricien que taxo-* ●●●

Sverbatim

ANOUK BARBEROUSSE

Professeure de philosophie des sciences, Sorbonne Université

« On s'interroge encore sur ce qu'est une espèce »

SORBONNE UNIVERSITÉ

« La notion d'espèce n'a rien d'évident, et elle a beaucoup évolué depuis Darwin. Lui-même n'était pas certain de pouvoir en donner une définition précise. Après lui, on a réalisé que les espèces naissent, se transforment, disparaissent : il n'a plus été possible de les décrire avec des caractères immuables. Puis le biologiste germano-américain Ernst Mayr (1904-2005) a fait la synthèse entre la théorie de l'évolution et la génétique. Il a notamment proposé une définition de l'espèce basée sur le fait que des individus sont capables de se reproduire entre eux. Mais une reproduction non sexuée existe également, chez certains micro-organismes par exemple. Il y a donc eu beaucoup de définitions, et le débat n'est pas clos. Aujourd'hui, on s'accorde au moins sur le fait que les espèces ont une dimension historique : elles sont déterminées par leur parenté et leur origine. Mais l'espèce humaine est-elle une espèce comme les autres ? Darwin en était convaincu, mais pas son confrère Alfred Russell Wallace, avec lequel il a eu un très vif débat. Tous deux défendaient pourtant des thèses évolutionnistes. Pour le public de l'époque, affirmer que les espèces se transforment pouvait déjà passer pour une attaque contre la religion, alors inclure l'humain dans l'évolution… c'était pire ! Aujourd'hui, alors que surgissent par exemple des questions de genre, que certains considèrent comme plus important que le sexe biologique, la question réapparaît : faut-il étudier l'humain avec les mêmes outils scientifiques que les autres espèces ? »

OPALE VIA LEEMAGE

« Ce n'est pas en observant les pinsons que Darwin a découvert la théorie de l'évolution, comme le voudrait la légende. Il n'y a pas eu de moment "eurêka" ! »

Thierry Hoquet,, professeur de philosophie des sciences à l'université Paris Nanterre

●●● *nomiste,* précise Guillaume Lecointre. *Il va donc s'appuyer sur la communauté scientifique de l'époque et envoyer à ses collègues les échantillons qu'il a recueillis à des fins de classement.* » Ainsi confie-t-il les pinsons à l'ornithologue John Gould, qui lui apprend qu'ils appartiennent à treize espèces d'un même groupe, dont les différentes formes de bec sont en adéquation avec la nourriture (graines, cactus) disponible sur chacune des îles.

En 1839, il publie son journal de voyage, alors que le « mécanisme » de sa théorie se met en place. Celui-ci repose sur la variation du vivant. Mais ce n'est plus la girafe de Lamarck qui allonge son cou. Sont favorisés certains individus dont le cou est plus long, par le hasard de ce qu'on appellera plus tard la génétique. « *Dans ses premiers carnets, Darwin suppose que seules les "bonnes variations", les plus favorables, vont se produire. Il va devoir surmonter cette idée pour admettre qu'il n'y en a, dans la nature, ni de bonnes ni de mauvaises* », souligne Thierry Hoquet. À partir de ces variations, une sélection s'opère, qui permet aux individus les mieux à même de survivre dans un environnement donné de se reproduire. « *Darwin lui-même hésite à employer le terme de sélection, dérivé du latin,* poursuit le philosophe. *C'est un concept qui n'existe pas encore. Il l'introduira tout de même dans le titre de son ouvrage, mais en précisant qu'il s'agit de la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie.* » Dès 1842, la théorie est prête. Deux ans plus tard, il rédige un essai… qu'il ne publiera pas. Car au même moment paraît *Vestiges of the Natural History of Creation*. L'auteur, Robert Chambers, est un éditeur écossais féru d'histoire naturelle et de spiritualisme. « *Il explique la transformation des êtres vivants en s'appuyant sur la paléontologie : dans les strates géologiques, on trouve les coquillages, puis les lézards, les oiseaux, et enfin les mammifères. Tout ceci suggère un progrès dans l'évolution du vivant, donc une histoire programmée par le divin* », raconte Thierry Hoquet. Guère étayé scientifiquement, l'ouvrage est cependant très populaire. « *Darwin redoute alors d'être associé par ses collègues naturalistes à cet auteur à l'imagination débridée,* poursuit le philosophe. *C'est pourquoi il consacrera encore plusieurs années à rendre sa théorie parfaitement crédible.* » Après la première publication en 1859, les éditions suivantes, quelques milliers d'exemplaires à chaque fois, s'arrachent dans les milieux érudits. Il y en aura six, la dernière datant de 1872.

Les thèses de Darwin se diffusent rapidement. « *Quant à la dimension d'exploration naturaliste, on ne la retrouve pas seulement dans la description des espèces telle que Darwin l'a pratiquée,* souligne Sarah Samadi. *Aujourd'hui, l'exploration des génomes est aussi un voyage.* »

JEAN-FRANÇOIS HAÏT

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #10

Se gratter le bras droit devant son miroir soulage… le gauche

Quatre chercheurs en neurologie de l'université de Lübeck (Allemagne) se sont vu remettre un Ig Nobel de médecine en 2016 pour leur avancée décisive sur le grattage-miroir. Ils ont montré qu'il est possible de soulager une démangeaison sur le bras droit en grattant le bras gauche. La clé du mystère ? Un miroir placé entre les bras, donnant l'illusion visuelle que c'est le bras droit qui est frotté. L'association perceptive illusoire des signaux visuels et tactiles liés à la démangeaison apporterait un réel soulagement. Plus qu'un tour de passe-passe, le grattage-miroir pourrait permettre d'apaiser des maladies cutanées avec prurit sans abîmer davantage la peau.

F. F.

Les navigateurs du génome

IBOD

Les années 2000 ont vu apparaître des expéditions naturalistes d'un genre nouveau, grâce aux progrès du séquençage des génomes. Il est possible, désormais, d'identifier rapidement une grande quantité d'espèces pour la plupart inconnues sans pour autant les étudier dans le détail. Ce, grâce à un gène particulier que l'on retrouve chez les animaux, végétaux et champignons, et dont la séquence varie selon les espèces : il constitue ainsi un « code-barres » génétique propre à chacune. Un concept imaginé par le zoologue Paul Hebert, de l'université de Guelph (Canada) en 2003.

Dans la foulée, des consortiums scientifiques se sont créés entre de nombreux pays pour réaliser des échantillonnages sur terre et mer, le plus ambitieux restant le projet International Barcod of Life (Ibol), qui a achevé en 2015 le programme Barcode 500K : les codes-barres de plus de 500 000 espèces ont été enregistrés. Le projet Bioscan, pour 2 millions d'espèces, a été lancé en 2019. Il s'agit de gagner une course contre la montre, car certaines espèces pourraient s'éteindre avant même d'avoir été découvertes.

L'objectif à l'horizon 2045, baptisé Mission biodiversité planétaire, est de constituer une gigantesque base de données du vivant.

Quant à la très médiatique goélette Tara, elle a collecté une grande diversité d'espèces de planctons entre 2009 et 2013. La mission Tara Microbiomes, actuellement en cours, vise à collecter un maximum de bactéries et virus marins. Les échantillons seront séquencés en masse, afin de comprendre la constitution des communautés microbiennes et leurs relations à l'environnement.

L'agrile du frêne *(Agrilus planipennis)*, un coléoptère parfois fatal à cet arbre, et son code-barres génétique.

Une stèle trouvée lors de la campagne d'Égypte... et un jeune érudit qui ne vit que pour en décoder les mystérieuses inscriptions. Son triomphe permettra à l'égyptologie de prendre son essor.

Champollion, conquérant des hiéroglyphes

Champollion ne l'a jamais vue ! C'est pourtant bien grâce à la pierre de Rosette qu'il parviendra à déchiffrer les hiéroglyphes… L'aventure commence sans lui, avec la campagne d'Égypte de 1798. Bonaparte, soucieux d'ajouter une dimension scientifique à cette expédition avant tout militaire et politique, et de s'inscrire dans la lignée des grands découvreurs, y embarque 160 savants. Une première ! Le 20 août, moins de deux mois après avoir débarqué à Alexandrie, il demande aux savants de former l'Institut d'Égypte au Caire, fondé pour « *s'occuper du progrès et de la propagation des Lumières en Égypte* ». Trois jours après, il en préside la première séance !

Un an plus tard parvient à l'Institut d'Égypte une nouvelle : dans le cadre de travaux destinés à rénover la citadelle de la ville de Rosette (Rashid), dans le delta du Nil, le lieutenant Pierre Bouchard a découvert une grande stèle noire couverte d'inscriptions : des hiéroglyphes dans la partie supérieure, du grec dans la partie inférieure, et du démotique – écriture simplifiée des anciens Égyptiens, qui n'est pas encore déchiffrée – au centre. « *La première annonce à l'Institut est passée relativement inaperçue,* souligne Dominique Valbelle, professeure émérite d'égyptologie à Sorbonne Université. *Les spécialistes reconnaissent le caractère exceptionnel de la pierre et commencent à l'étudier. Mais ils tournent en rond. Les hiéroglyphes sont à la fois phonétiques et figuratifs. Et ceux de la pierre de Rosette, d'époque tardive, transcrivent davantage de phonèmes que dans des temps plus anciens, ce qui complexifie la traduction.* »

Dès 1800, une copie des inscriptions est néanmoins expédiée à l'Institut de France à Paris. Heureuse initiative car, l'année suivante, défaits par les Anglais, les Français doivent quitter l'Égypte et céder aux vainqueurs leur précieuse collection de monuments antiques… Dont la pierre de Rosette, qui parvient au British Museum, où elle est toujours exposée. Les savants travaillent donc sur des reproductions.

COLLECTION DAGLI ORTI / MUSÉE DU LOUVRE PARIS / AURIMAGES

Dominique Valbelle, Robert Solé, *La Pierre de Rosette*, Seuil, 1999

Découverte en 1799 lors de la campagne d'Égypte, déchiffrée vingt ans plus tard, cette stèle de granite est gravée en trois langues : hiéroglyphes, démotique (ici, en bas) et grec ancien.

Vingt ans après, le mystère demeure

Commence alors une course passionnante et passionnée. Si le texte grec est rapidement traduit, les deux autres, en revanche, résistent : tandis que l'orientaliste français Isaac Silvestre de Sacy identifie des noms propres dans le texte démotique, le Suédois David Akerblad et le physicien anglais Thomas Young parviennent à déchiffrer quelques signes. Mais vingt ans après… le mystère demeure. Il n'attend plus qu'un jeune prodige, Jean-François Champollion. Celui-ci, qui maîtrise les langues anciennes et orientales, a commencé à étudier la pierre de Rosette en 1808, à 18 ans ! « *La différence entre Champollion et les autres, c'est son acharnement,* estime Dominique Valbelle. *S'appuyant sur les cartouches de Ptolémée et de Cléopâtre, il a élargi petit à petit sa recherche, s'est procuré le corpus de documents le plus large possible, s'est rendu en Égypte pour comparer avec d'autres inscriptions. Il doit sa réussite à son courage et sa vaste culture.* »

Le 27 septembre 1822, Champollion annonce au secrétaire de l'Académie française qu'il a trouvé la clé du déchiffrement de cette écriture qu'il définit ainsi : « *Tout à la fois figurative, symbolique et phonétique dans un même texte, dans une même phrase, je dirais même dans le même mot.* » L'égyptologie pouvait prendre son essor.

SYLVIE BRIET

GAMMA RAPHO

interview

ALAIN CORBIN
Historien, spécialiste de l'histoire des sens, professeur honoraire à l'université Paris I Sorbonne

« En 1883, on a pu suivre presque en direct l'éruption du Krakatoa »

Vous faites du tremblement de terre de Lisbonne, survenu le jour de la Toussaint 1755, une date-clé des sciences de la Terre. Pourquoi ?
Ce fut une immense catastrophe – à la fois tremblement de terre et raz-de-marée, suivis d'un incendie qui a duré plusieurs jours – dans laquelle périrent au moins 10 000 personnes. Or, au lieu de voir dans ce malheur la seule main de Dieu, les savants entrèrent dans l'explication et l'analyse. Après Voltaire et son *Poème sur le désastre de Lisbonne*, publié en 1756, d'Holbach puis Diderot vont mettre ce genre d'événement non pas sur le compte de lois ou de punitions divines, mais tout simplement de causes naturelles. C'est un tournant essentiel.
C'est aussi à partir de 1755 que l'Académie des sciences, en France, mène une vraie politique d'étude des séismes. Le débat scientifique cherche à percer ce secret de la nature. Un espace de discussion s'ouvre entre les savants, qui avancent trois types d'explication. La première invoque un incendie souterrain. La seconde, qui s'imposa jusqu'au XXe siècle, une dilatation de l'air, produisant des mouvements brusques. La troisième considère la secousse comme une propagation instantanée de fluide électrique dans les corps conducteurs.

Quel est l'état des connaissances à cette époque ?
Au siècle des Lumières, les inconnues sont encore multiples. En 1755, les savants décrivent le ciel en termes peu nombreux : sombre, lumineux, pluvieux, torrentiel, verglacé ou neigeux. On connaît les alizés, mais on ignore tout de la circulation atmosphérique, de l'origine ou du trajet des tempêtes… Il faut attendre le début du XIXe siècle pour que l'on commence à comprendre que les phénomènes météorologiques peuvent avoir une origine très lointaine. C'est aussi en 1802 que le Britannique Luke Howard présente sa nomenclature des nuages et tente d'expliquer leurs mécanismes de formation et leur évolution. Les brouillards sont alors vus comme des exhalaisons terrestres, et la prévision météo est l'apanage des anciens, qui savent voir et ressentir le ciel.
La structure interne de la Terre est encore plus mal connue, faute de sondages profonds. Au XVIIIe siècle, deux théories rivalisent : les plutoniens, disciples du géologue écossais James Hutton, envisagent notre planète comme une boule de feu refroidie, contenant des matières encore très chaudes. Les neptuniens, dans le sillage de l'Allemand Abraham Gottlob Werner, pensent qu'elle a été modelée par les mers.

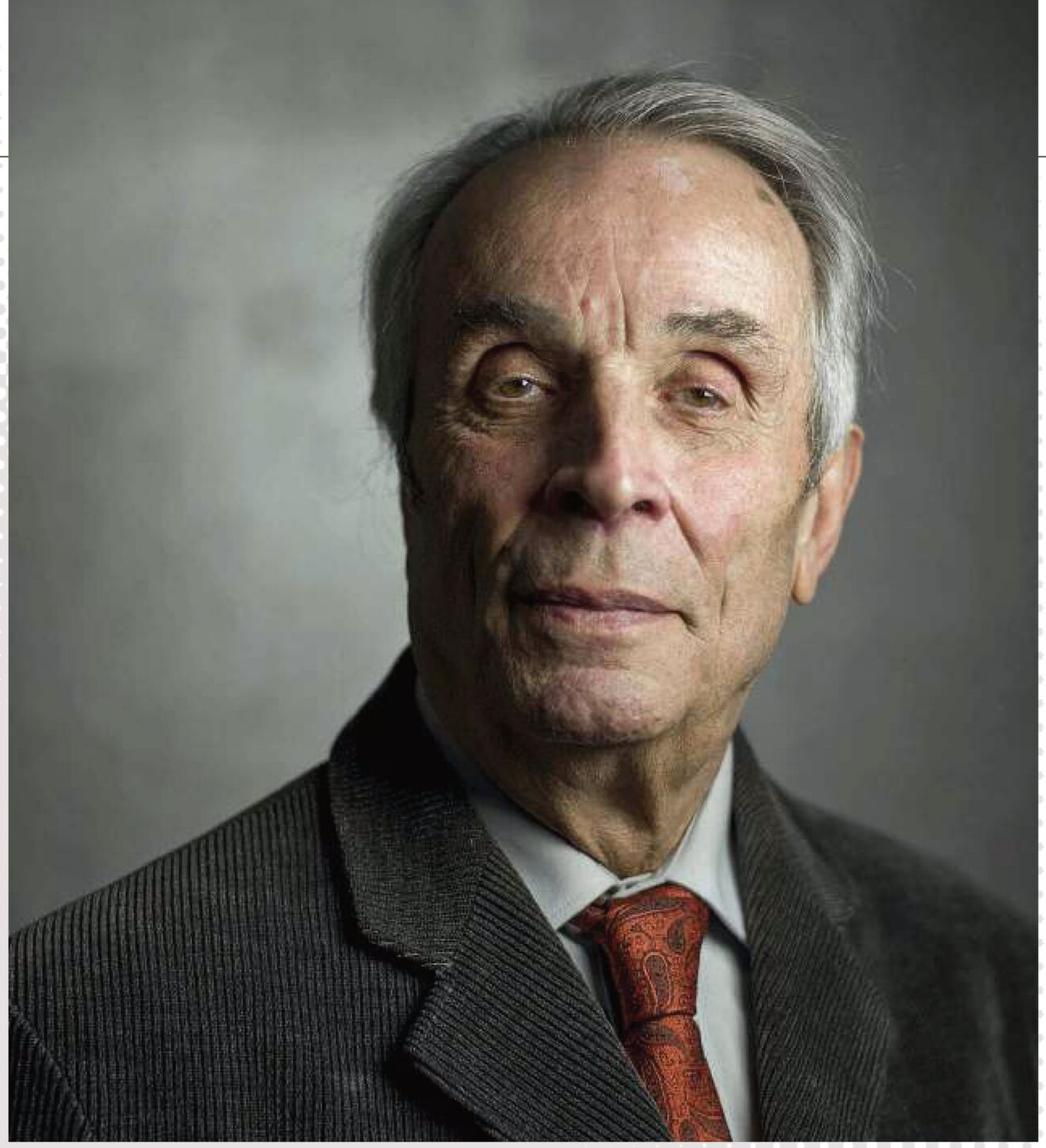
A-t-on déjà exploré les pôles et les profondeurs des océans ?
Les pôles demeureront inaccessibles jusqu'au XXe siècle ! Certains savants, refusant l'idée que la mer puisse geler, pensent qu'ils abritent une mer libre, passé l'obstacle des glaces venues des continents. De nombreuses expéditions échouent, des équipages périssent à cause du froid ou du vent… James Cook, qui réalise la première circumnavigation de l'Antarctique (1772-1775), bute sur la banquise et conclut à l'inexistence d'un continent au pôle Sud.
Les abysses demeurent elles aussi un mystère. L'homme ne connaît que les faibles profondeurs atteintes en apnée par les pêcheurs d'éponges. Et les savants se montrent réticents à l'idée des grands fonds.

Les religions ont-elles été une entrave à la connaissance de la Terre ?
L'histoire géologique a longtemps été oblitérée par l'histoire biblique. Pour la Chrétienté – autrement dit l'Europe et les empires coloniaux –, c'est la Bible qui prévaut : la Terre et l'ensemble des corps célestes ont été créés par Dieu. Au XVIIe siècle, Bossuet, personnalité éminente, estime l'âge de la planète à environ 6 000 ans. L'épisode du Déluge raconté dans la Genèse, que celle-ci justifie par la méchanceté des hommes, perdure jusque dans les explications scientifiques du XVIIIe siècle à travers les théories diluvialistes : ce sont les eaux du Grand Abîme qui auraient façonné la Terre. L'imagination s'empare des lieux inaccessibles, avec une grande puissance émotionnelle. On envisage les abysses comme une partie cachée de la Création, sinon comme la face ténébreuse du monde. Le volcan paraît être en contact direct avec les

entrailles de la Terre que l'historien Michelet, au XIXe siècle, verra comme un cœur palpitant. Les pôles abritent un bestiaire monstrueux peuplé de dragons ou de licornes. Le ciel, lui, relève du royaume de Dieu.

Selon vous, les années 1860 voient s'accélérer la connaissance scientifique de la Terre. Pour quelles raisons ?

On assiste alors à une conjonction de phénomènes qui rend possible un progrès sans précédent du savoir. On observe d'abord le recul des références à la Bible, concomitant à l'essor d'un esprit scientifique et rationnel issu des Lumières. Il y a aussi l'engagement des États pour soutenir les travaux scientifiques. En météorologie, par exemple, l'Observatoire de Paris pilote, dès juin 1856, un réseau météo-télégraphique national, sous l'impulsion de Napoléon III. Mais surtout, ces développements sont rendus possibles par les progrès spectaculaires des techniques : en météorologie, les relevés et l'échange mondial de données permettent de cartographier le ciel et de suivre les masses d'air. Dans les années 1860, le ballon devient dirigeable et instrumenté. Les observations aériennes contribuent à dessiner l'espace atmosphérique, jusqu'à ce que le météorologue Léon Teisserenc de Bort présente ses travaux en 1902, distinguant basse et haute atmosphères, troposphère et stratosphère. La connaissance des volcans progresse, elle aussi. En 1866, après une longue étude de Santorin et des Cyclades, Ferdinand Fouqué décrit la formation du cône volcanique par l'accumulation des matières rejetées. Le volcanologue avancera la théorie prometteuse de lignes de fragilité dans l'écorce terrestre. La méconnaissance des glaciers avait, elle, déjà reculé entre 1820 et 1840, avec l'hypothèse d'un âge glaciaire présentée en 1837 par le Suisse Louis Agassiz. Ces connaissances, étayées par l'observation géologique, expliquent enfin les paysages, avec la présence de blocs erratiques jusque dans les vallées.



JEAN LUC BERTINI/ PASCO AND CO

« Au XVIIIe siècle, les plutoniens envisagent la Terre comme une boule de feu refroidie contenant des matières encore chaudes, les neptuniens pensent qu'elle a été modelée par les mers »

Ce progrès des connaissances est parallèle au développement des nouveaux moyens de communication et de l'accélération des échanges ?

Exactement. D'une part, la multiplication des sociétés savantes stimule la recherche et l'intérêt pour les sciences, tout comme l'organisation de congrès internationaux dans toutes les disciplines. D'autre part, l'électrification et la prolifération des câbles télégraphiques – qui vont de pair avec une meilleure connaissance des fonds marins – contribuent elles aussi à l'accélération des connaissances grâce à l'échange rapide d'informations à l'échelle du globe. Pour mémoire, la première communication transatlantique a lieu en 1858. Jusque-là, les causes lointaines étaient méconnues. Un exemple : fin 1815, le volcan indonésien Tambora entre en éruption, ce qui va engendrer dans l'hémisphère Nord, pendant près de deux ans, refroidissement climatique, brouillards secs, pluies diluviennes, soleil voilé… Dérèglement que l'on n'associera qu'un siècle plus tard à l'éruption. En 1883, moins de soixante-dix ans après le Tambora, un autre volcan indonésien explose, le Krakatoa. Les câbles et le réseau mondial d'instruments de mesure permettent alors de suivre presque instantanément la chronologie de l'éruption, son impact sur la composition atmosphérique, la hauteur des raz-de-marée… Une preuve parmi tant d'autres du bond spectaculaire effectué par les sciences de la Terre à cette époque.

PROPOS RECUEILLIS PAR FRANÇOIS FOLLIET

La Terre, vue par le radiomètre infrarouge VIIRS, embarqué à bord du satellite météorologique Suomi utilisé pour l'étude du réchauffement climatique. Les différentes couleurs des nuages indiquent leur température.

NOAA NATIONAL ENVIRONMENTAL SATELLITE, DATA, AND INFORMATION SERVICE (NESDIS)

PLANÈTE SOUS SURVEILLANCE RENFORCÉE

Pour documenter le changement climatique, les sciences de la Terre, alimentées par des milliards de données, ont fait un bond de géant. Et permis de mieux comprendre les interactions entre continents, océans et atmosphère.

C'est désormais une certitude. La planète affronte depuis deux siècles la hausse des températures la plus rapide de sa longue histoire géologique. Le climat déraille. Et si l'humanité en a pris conscience, c'est parce que la science a appris à le mesurer. Des intuitions du début du XXe siècle aux évidences des observations du XXIe siècle, des générations de chercheurs ont petit à petit décrit les interactions entre l'atmosphère, les océans, la végétation, les zones polaires englacées, la géologie. En recherchant les causes du changement climatique, l'homme a découvert le fonctionnement intime de sa planète. Et créé un nouveau champ d'étude, les sciences de la Terre, qui regroupent aujourd'hui les domaines étudiant l'atmosphère (l'air), l'hydrosphère (l'eau), la biosphère (végétaux et animaux), la cryosphère (les glaces), la lithosphère (l'érosion des sols et les volcans), auxquels s'ajoute l'action de l'homme sur ces milieux. Les chercheurs parlent également de « zone critique », de la cime des arbres aux nappes phréatiques, cette couche de quelques dizaines de mètres autour de la surface de la Terre où se concentre l'essentiel de la vie, et où l'action de l'homme est la plus intense.

La démarche remonte loin dans le temps. *« Dès le XIXe siècle, les scientifiques ont voulu mesurer précisément les températures et les* ●●●

Éric et Catherine Guilyardi, *Que feriez-vous si vous saviez? Des climatologues face à la désinformation,* Le Pommier, 2015

Cinquième rapport du Giec (2014) : www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/

●●● *précipitations. Ce travail a très rapidement pris une ampleur internationale, car l'étude du climat implique d'explorer les phénomènes sous d'autres latitudes* », raconte Hélène Guillemot, historienne des sciences. L'ambition première était de prévoir le temps à l'échelle de quelques jours. Mais dès 1896, le chimiste suédois Svante Arrhenius avance la théorie selon laquelle l'homme relâche dans l'atmosphère du CO_2 qui retient le rayonnement solaire et augmente la température à la surface de la planète. *« Il est d'autant moins écouté que ses calculs préliminaires suggèrent un effet climatique à des milliers d'années »,* rappelle Éric Guilyardi, directeur de recherches au Laboratoire d'océanographie et du climat de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), l'organisme de recherche français qui regroupe les neuf principaux laboratoires travaillant sur le climat.

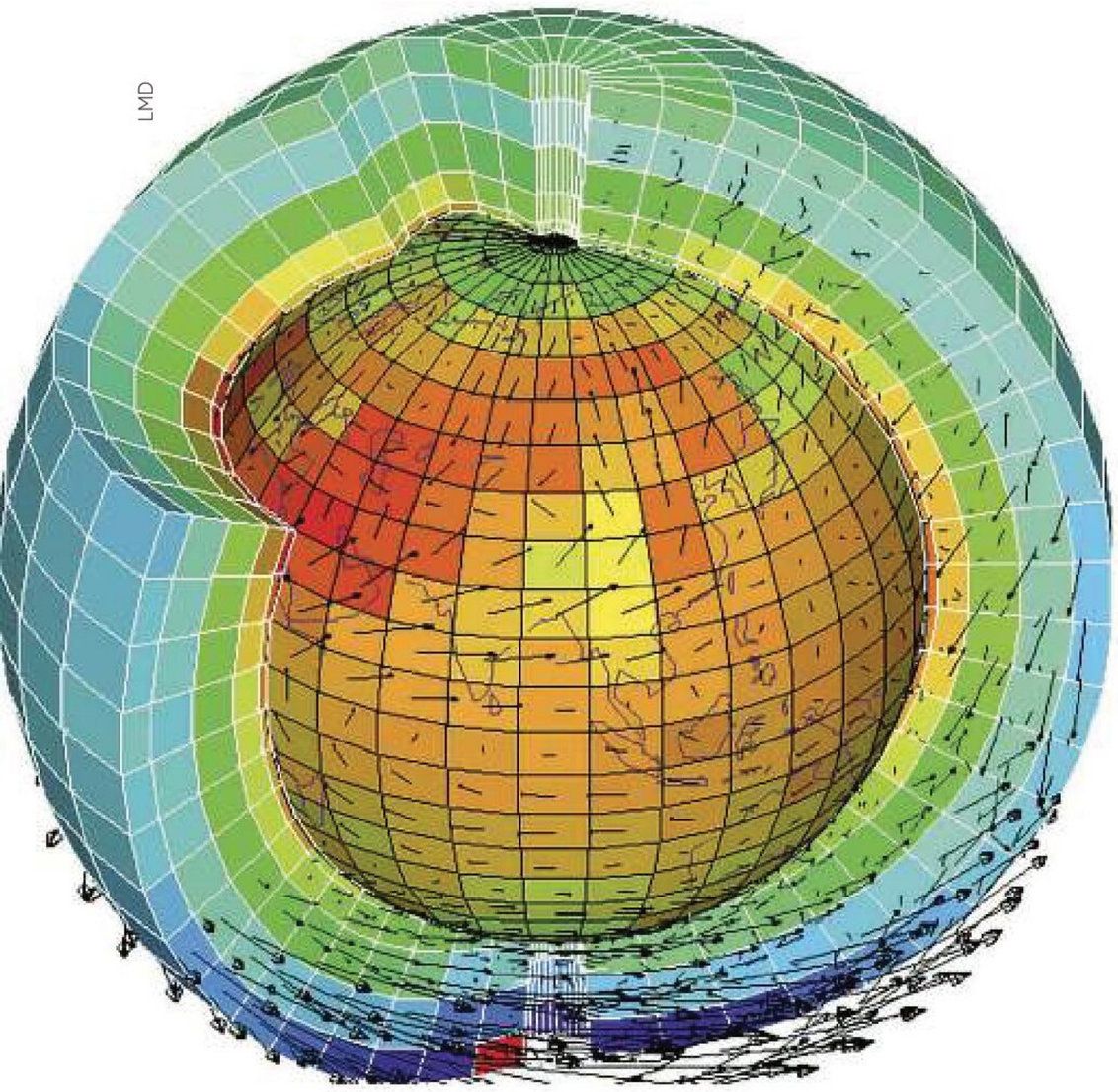
En 1953, un chercheur américain réalise la première prévision du temps par ordinateur

Il faut attendre la fin de la Seconde Guerre mondiale, et les débuts de l'informatique, pour que la recherche météorologique prenne un véritable élan. *« C'est à Princeton, au sein du Numerical Meteorology Project fondé en 1946, que des chercheurs développent les premiers modèles de circulation des masses atmosphériques au niveau de la planète,* précise Hélène Guillemot. *Ils s'appuient sur des avancées théoriques réalisées dans les années 1930 et 1940 pour construire des algorithmes que les calculateurs peuvent désormais exploiter. »* La première prévision du temps par ordinateur, réalisée sous l'égide de Jule Charney, chercheur américain à l'Institute for Advanced Study, date de 1953, et la première simulation de la circulation globale de l'atmosphère de 1955. Dix ans plus tard, le glaciologue français Claude Lorius, en mission en Antarctique, a l'idée de rechercher la composition atmosphérique des siècles passés en capturant, par forage dans l'inlandsis, les bulles d'air piégées dans la glace qui s'accumule depuis des millions d'années aux pôles.

Le domaine n'attire pourtant pas des foules de doctorants. *« Dans les années 1960, ce sont les travaux sur la tectonique des plaques qui fascinaient ma génération,* se souvient Jean Jouzel, paléoclimatologue au CNRS. À *cette époque, on m'enseignait que le climat était stable du fait de sa grande inertie. »* Au cours de cette décennie, cependant, les trois modèles numériques du climat existants, deux américains et un britannique, examinent les effets d'un doublement du CO_2 dans l'atmosphère. Le travail est grossier, mais conclut à une hausse de 5 °C des températures d'ici trois siècles. En France, un modèle est construit en 1968 au sein du Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), aujourd'hui intégré à l'IPSL. Les premiers satellites d'observation de l'atmosphère, dont MétéoSat de l'opérateur européen Eumetsat lancé en 1977, donnent depuis l'espace des images de la formation des dépressions et anticyclones. Ils ouvrent une nouvelle voie d'observation du climat.

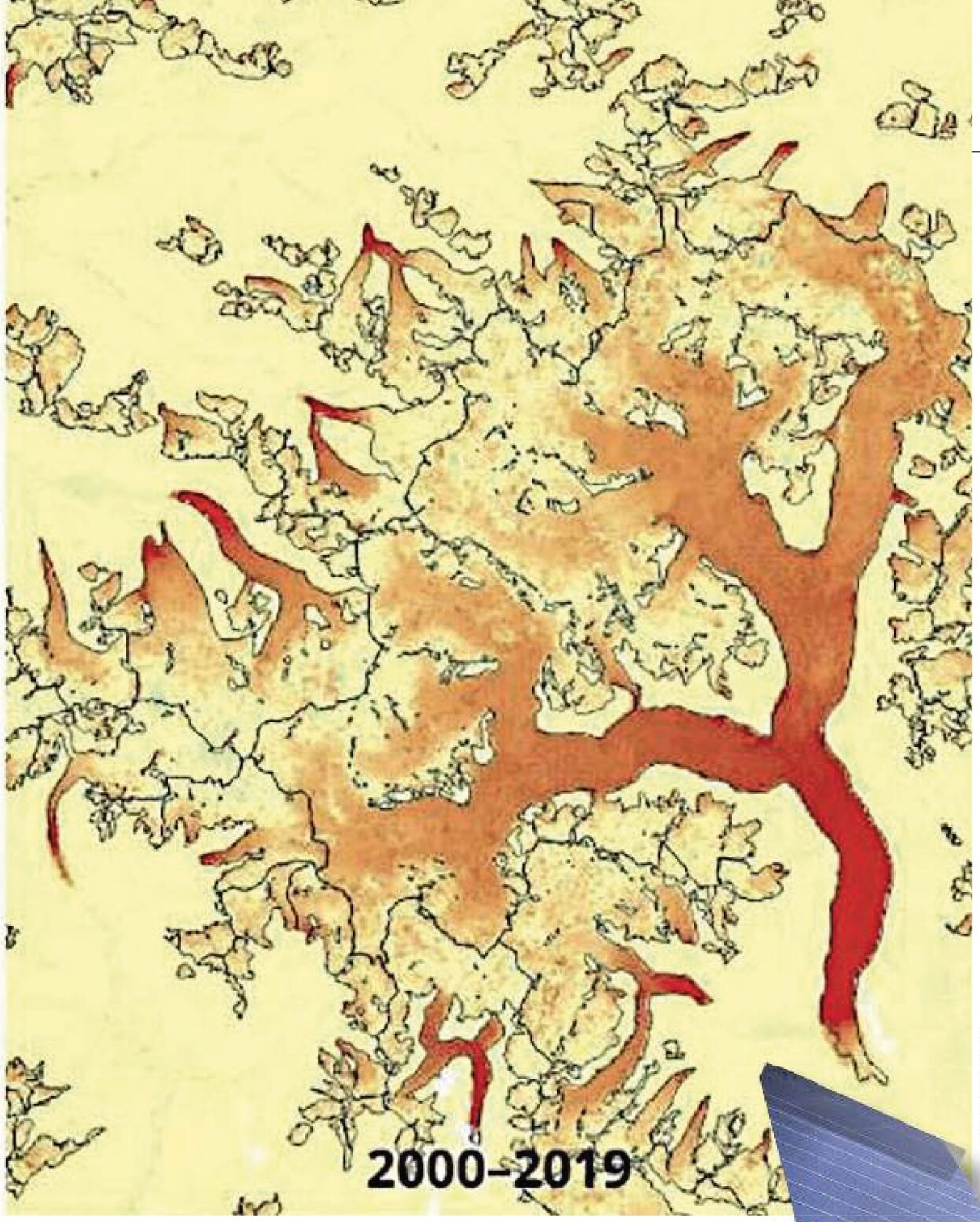
En juillet 1979, Jule Charney remet au Sénat américain son rapport intitulé : « CO_2 et climat : une

ROMAIN HUGONNET/LEGOS



LMD

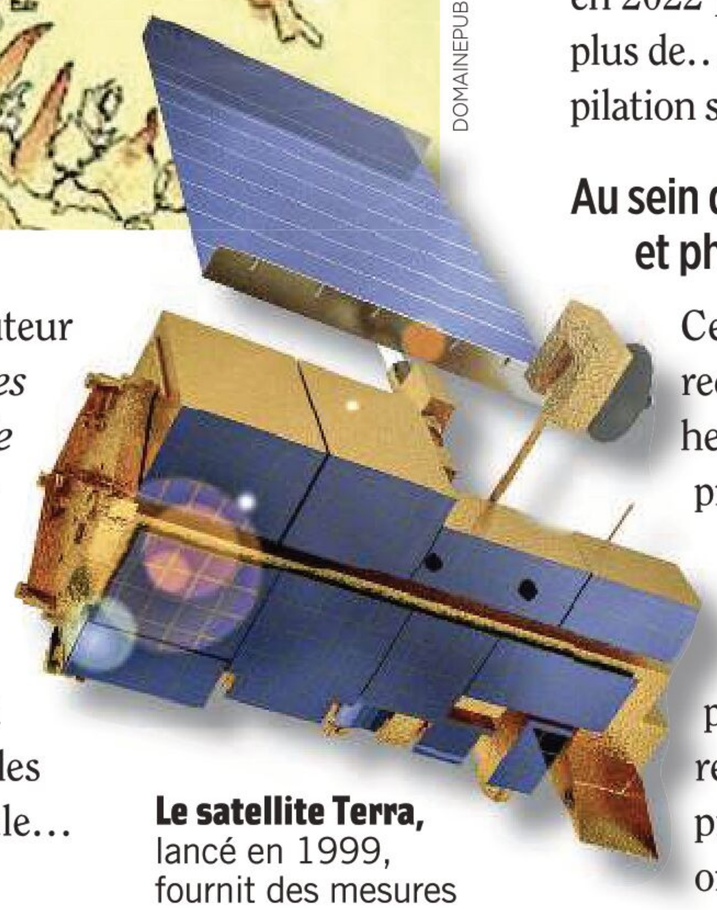
Le climat en 3D. Le modèle de circulation générale de l'atmosphère LMDz permet de calculer l'évolution des variables météorologiques (températures, vent, etc.) à partir de « boîtes » de 100 à 150 kilomètres de côté.



DOMAINEPUBLIC

évaluation scientifique ». En introduction, l'auteur affirme : *« Nous avons maintenant des preuves irréfutables que l'atmosphère est en train de changer et que nous-mêmes contribuons à cette modification. Les concentrations de CO_2 augmentent fortement, et ces changements sont liés à l'utilisation par l'homme des énergies fossiles et à l'exploitation des terres. »* Tout est dit, mais le constat reste confiné aux cercles scientifiques. Et une décennie entière s'écoule… sans aucune réaction politique.

L'exploitation des carottes de glace sur les stations Vostok et de celle du programme groenlandais Grip, à partir de l'idée émise par Claude Lorius vingt ans plus tôt, accouche d'une série d'articles scientifiques retentissants en 1987. *« Cela a été un choc* ! se souvient Jean Jouzel, co-auteur de ces articles avec Claude Lorius. *Nos mesures montraient qu'un changement spectaculaire s'était déjà opéré en moins de cent cinquante ans* ! » En 1988, le climatologue américain James Hansen publie dans le *Journal of Geophysical Research* un diagramme présentant trois scénarios de l'évolution du climat selon que l'homme décide ou non de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Si rien n'est fait pour limiter ces rejets, prévient le chercheur, les températures vont augmenter d'au moins 5 °C d'ici 2100. Limiter cette hausse implique de réduire tout de suite la combustion d'énergies fossiles. Message dérangeant pour un monde qui fonctionne alors à 98 % au charbon, au pétrole et au gaz.



Le satellite Terra, lancé en 1999, fournit des mesures permettant de représenter les interactions entre l'atmosphère, la Terre et les océans. Ici, l'accélération de la fonte d'un ensemble de glaciers situé en Colombie-Britannique (Canada), entre 2000 et 2019.

L'ONU convient donc de la nécessité d'un groupement scientifique d'un genre nouveau, qui doit répondre à la demande des « décideurs », soit les dirigeants des 195 États membres. En 1988, avec l'Organisation mondiale de météorologie (OMM), elle crée le Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), dans une configuration qui n'a, depuis lors, pas changé. Un premier groupe de travail fait le point des connaissances sur le fonctionnement physique et chimique du climat, un deuxième planche sur les moyens techniques et scientifiques permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, un troisième propose des solutions pour adapter les sociétés à un climat plus chaud. Le premier rapport, publié en 1990, compte 180 pages. Le sixième va être édité en août 2021 pour le groupe 1, en 2022 pour les deux autres. Il devrait comporter plus de… 5000 pages. C'est la plus imposante compilation scientifique jamais réalisée à ce jour.

Au sein des nuages, 7000 composés chimiques et physiques dont on ignore presque tout

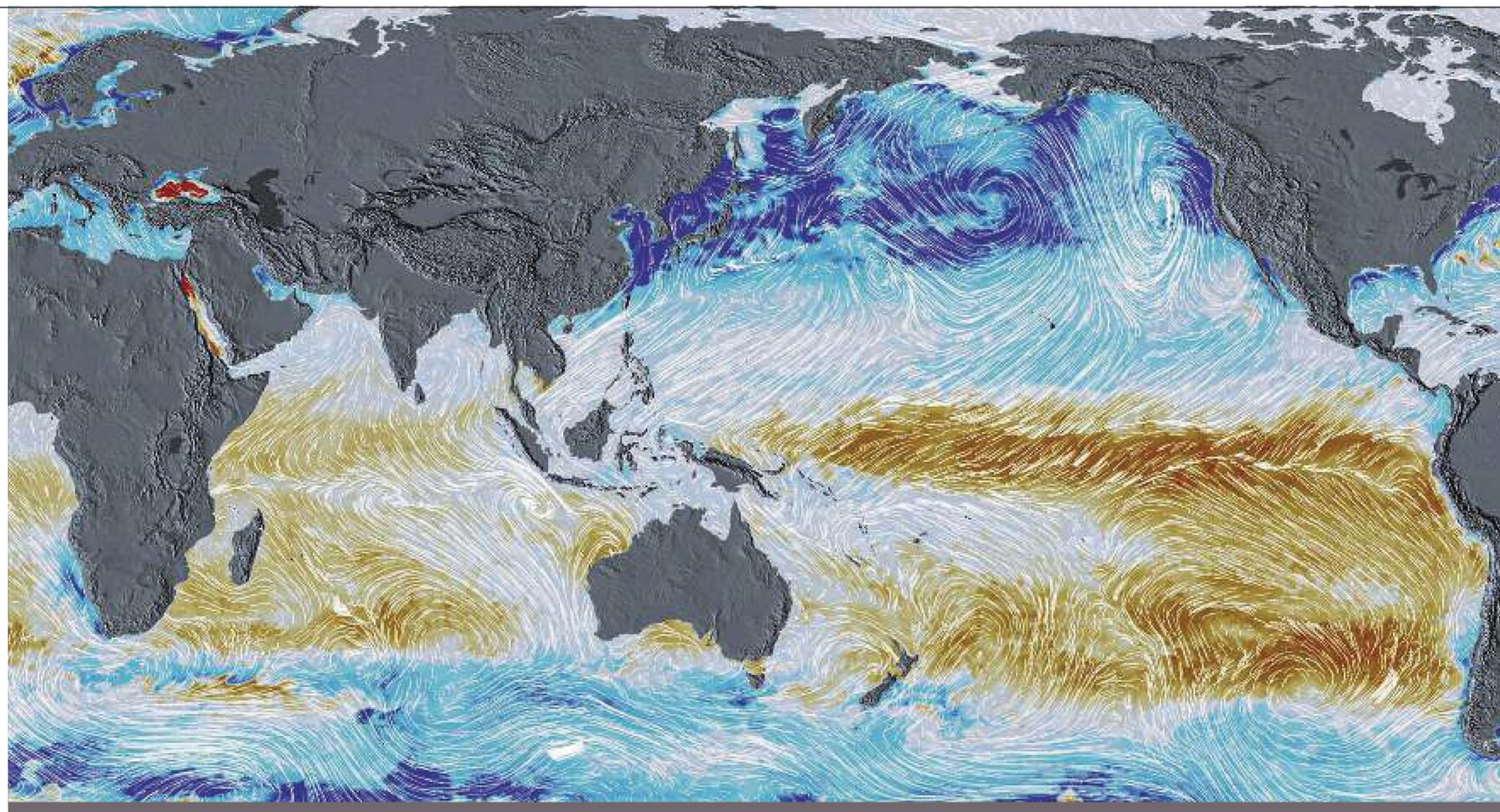
Cela s'explique. La Terre est un objet de recherche imposant, qui ne peut être appréhendé dans sa complexe globalité. Aussi les progrès scientifiques, nombreux, paraissent toujours modestes. Un exemple ? En mars 2021, Houssni Lamkaddam, doctorant à l'Institut Paul-Scherrer (Suisse), publiait dans *Science Advances* un article remarqué sur les transformations des isoprènes au sein des nuages. Ces composés organiques volatils, dont les arbres émettent chaque année six milliards de tonnes, facilitent la condensation des gouttelettes d'eau – donc la pluie – et absorbent le rayonnement solaire. Ils contribuent ainsi à refroidir le climat. Beau résultat… mais partiel. Car les cinq observatoires des nuages que compte le monde font état d'environ 7000 composés chimiques et physiques générateurs de la formation des gouttelettes d'eau, dont on ne connaît rien, ou presque, du rôle dans l'atmosphère. *« Les sciences du climat ne produisent pas du spectaculaire,* précise Éric Guilyardi. *Elles accumulent des quantités de petites avancées qui, prises dans leur ensemble, finissent par donner une vision réaliste du fonctionnement de la planète. »*

Les chercheurs progressent malgré tout, bien aidés par la puissance croissante des calculateurs numériques, la mise à l'eau de réseaux de bouées en ●●●

LES DÉCOUVERTES IMPROBABLES #11

La grenouille en lévitation

Pour couronner cette science qui fait rire, puis réfléchir, voilà un vrai Prix Nobel lauréat d'un Ig Nobel : le physicien néerlandais Andre Geim. Nobélisé en 2010 pour ses travaux sur le graphène, une feuille de carbone de l'épaisseur d'un atome, Andre Geim s'était distingué dix ans plus tôt pour avoir fait léviter une grenouille à l'aide d'aimants. Comment briser la gravité du batracien ? Grâce à un comportement particulier de l'eau, le diamagnétisme. Soumise à un champ magnétique, elle produit un champ magnétique opposé. La grenouille placée dans un électroaimant produisant un puissant champ de 16 teslas, la voilà qui lévite, sans supercherie ! Un comportement qui s'explique par un changement du mouvement des électrons autour du noyau de certains atomes du corps de l'animal, composé notamment d'eau. La grenouille volante s'en est sortie indemne. **F. F.**



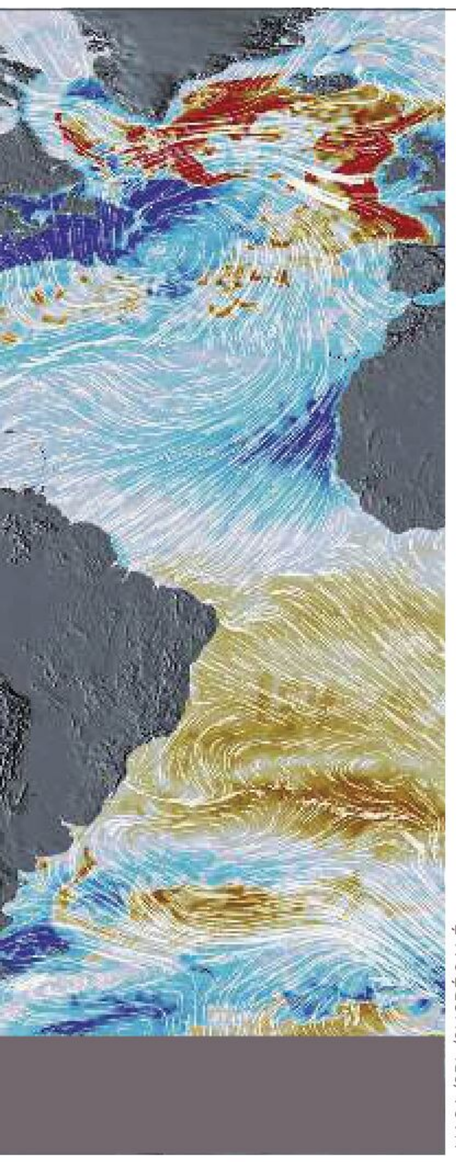
L'océan absorbe (en bleu) plus de 30 % des émissions de CO_2, notamment par dissolution du gaz. Mais dans certaines zones (en orange-rouge), le réchauffement climatique inverse le processus. On parle de dégazage.

●●● mer, les instruments de mesure de captation du CO_2 par les arbres et végétaux, les ballons-sondes d'exploration de l'atmosphère. Les avancées réalisées lors des deux dernières décennies doivent beaucoup aux satellites d'observation. Ainsi, une équipe internationale dirigée par le Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (Legos), à Toulouse, a exploité un demi-million d'images prises par le satellite Terra pour obtenir l'évaluation la plus précise de l'évolution des 220 000 glaciers partout dans le monde. Son étude, publiée en avril 2021 dans *Nature,* est sans surprise : tous fondent, et leur contribution à la montée du niveau des mers est même majeure. *« Leurs volumes d'eau partant à la mer représentent 267 milliards de tonnes par an, pour 200 milliards pour l'inlandsis du Groenland et 130 milliards pour celui de l'Antarctique »*, résume Étienne Berthier, chercheur au Legos. Une précision inimaginable dix ans plus tôt.

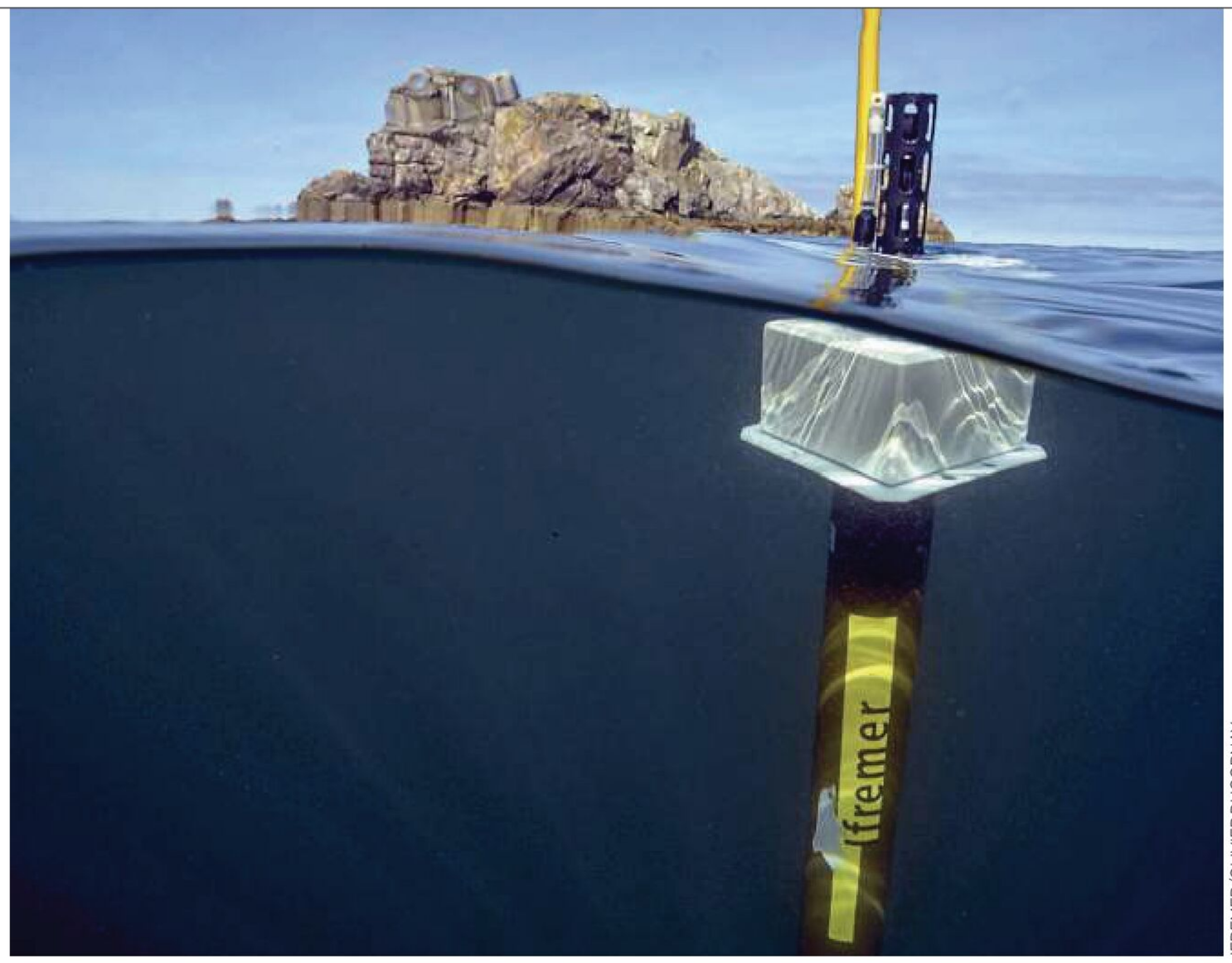
Sentinel, Grace, Envisat : des dizaines de satellites mesurent aujourd'hui la hausse du niveau des mers, les émissions de six gaz à effet de serre, la capacité des plantes à capter le CO_2, etc. Les instruments embarqués n'ont cessé de se perfectionner. *« Pour moi, l'une des plus grandes ruptures technologiques, c'est le lidar, utilisé depuis la fin des années 1990,* estime Philippe Drobinski, directeur du LMD. *L'utilisation du laser nous a donné des informations*

Des chercheurs mobilisés pour trouver des solutions

Le dernier champ scientifique ouvert par les climatologues, c'est l'attribution des phénomènes extrêmes au réchauffement. Les canicules, les ouragans, les inondations exceptionnelles sont-ils causés par la hausse globale des températures ? ***« Mon travail au LMD, c'est d'apporter des bases physiques à ce qui n'était auparavant qu'un calcul théorique de probabilité »***, **précise Davide Faranda, chercheur au CNRS.** ***« Mais notre travail ne peut plus seulement être académique,*** **professe Aglaé Jézéquel, chercheuse au LMD, fondatrice d'un groupe de réflexion sur le sujet.** *Déterminer la cause d'une catastrophe nous oblige à nous demander de quelle manière notre travail peut être utile et utilisable par les personnes victimes de ces aléas exceptionnels. »* **Éric Guilyardi apporte, avec beaucoup d'autres, sa propre réponse.** ***« Le programme Aclima-Terra de Nouvelle-Aquitaine nous impose de réfléchir au niveau d'un territoire, avec les habitants, aux réponses à apporter au changement climatique. Au-delà de la rédaction des rapports du Giec, le nouveau rôle des scientifiques est de faciliter l'appropriation des enjeux environnementaux par les acteurs locaux »***, **revendique-t-il. Quelle protection du littoral ? Comment adapter l'agriculture ? Comment orienter le tissu économique ? C'est aussi la volonté de Philippe Drobinski. Le directeur du LMD travaille au sein de Energy 4 Climate, un organisme qui rassemble l'expertise de 21 laboratoires de l'Institut polytechnique de Paris sur le développement technologique des énergies renouvelables.** ***« On ne peut plus se contenter d'être les "oncologues de la planète" toujours porteurs de mauvaises nouvelles,*** **assure-t-il.** ***Il nous faut faire notre part dans le développement des solutions techniques qui servent à toute la société. »***



NASA/SPL/SUCRÉ SALÉ



IFREMER/OLIVIER DUGORNAY

Le programme international Argo, lancé en 2000, vise à comprendre et prévoir le rôle des océans dans le climat. Il s'appuie sur près de 3 000 balises flottantes qui mesurent, en temps réel, la température et la salinité, depuis la surface jusqu'à 2000 mètres de profondeur.

d'une grande précision sur les différentes couches de l'atmosphère, auxquelles nous ne pouvions accéder auparavant que par des ballons-sondes et des radars terrestres. » Les océanographes saluent, eux, l'investissement dans le réseau Argo, créé en 2000 par l'OMM et l'Unesco. Ses 3 000 balises couvrant les océans donnent en temps réel, via les satellites, la température et la salinité des 2 000 premiers mètres des mers, des informations essentielles pour comprendre leur rôle dans l'absorption du CO_2.

L'océan, principal responsable de l'équilibre du climat terrestre

Ces progrès techniques ont chamboulé la manière de travailler des chercheurs. Finis les domaines réservés, vive l'interdisciplinarité ! « *À l'orée des années 1990, la science du climat en France est naissante, en retard vis-à-vis notamment des Anglo-Saxons* rappelle Hélène Guillemot. *Elle ne dispose pas du modèle reconstituant les interactions entre océan et atmosphère nécessaire aux projections climatiques à long terme.* » Éric Guilyardi se souvient que lorsqu'il a passé sa thèse en 1997, « *les spécialistes de l'atmosphère et ceux des océans se parlaient peu et n'utilisaient même pas des systèmes de mesure identiques* ». Il faut dire que les deux milieux sont très différents. Avec une inertie très forte et des courants profonds entraînant des masses d'eau de surface pendant des centaines d'années, l'océan constitue le partenaire « lent », tandis que l'atmosphère, le partenaire « rapide », connaît des changements imprévisibles au-delà de dix jours. Il y a vingt-cinq ans, les climatologues pensaient que le moteur principal du fonctionnement climatique de la Terre ne pouvait être que ce chaos atmosphérique. Mais les progrès accomplis ont montré au début des années 2000 que l'acteur essentiel de l'équilibre du climat terrestre est au contraire l'océan, qui absorbe 90 % de l'excès de chaleur dû au réchauffement climatique et 30 % du CO_2 émis par nos activités.

ECOLE POLYTECHNIQUE

« L'utilisation du lidar nous a donné des informations d'une grande précision sur les différentes couches de l'atmosphère, auxquelles nous ne pouvions accéder auparavant que par des ballons-sondes et des radars terrestres »

Philippe Drobinski
directeur du Laboratoire de météorologie dynamique de l'Institut Pierre-Simon Laplace

Toutes ces sources concourent à nourrir des modèles de simulation du climat de plus en plus précis. Ils sont aujourd'hui une vingtaine à « tourner » dans le monde, dont deux en France : ceux de l'IPSL et de Météo-France. Pour reconstituer par algorithmes les courants marins, les vents, l'humidité, la température, la respiration des végétaux et les rejets des volcans, ils découpent la planète en « boîtes » de 100 à 150 kilomètres de long. L'atmosphère compte 91 niveaux de la surface à la stratosphère, les océans 75 strates jusqu'à -3 000 mètres ; quant à la surface de la Terre, elle est quadrillée de 362 boîtes par degré de longitude et 294 en latitude. « *Un modèle de climat consiste à représenter ces processus physiques sous forme d'équations mathématiques,* décrit la climatologue Pascale Braconnot, directrice de recherche au CEA. *En reliant ces cases, on peut opérer des bilans énergétiques entre elles.* » Un exemple : en moyenne, l'apport d'énergie du soleil au sol est de 240 watts par mètre carré (W/m^2). Les émissions humaines perturbent ce bilan en y ajoutant leurs propres gaz à effet de serre. Les modèles permettent de calculer les conséquences d'un ajout de 2,6, 4,5, 6 ou 8,5 W/m^2 d'ici 2100. Pour la première fois, l'homme calcule avec des décennies d'avance les effets de son action sur son milieu ! Et il ne peut plus dire qu'il ne pouvait pas savoir.

LOÏC CHAUVEAU

Page réalisée par Sara de Lacerda

Sur notre site

Une cité d'or au bord du Nil ?

REUTERS/AMR ABDALLAH DALSH

Les murs ondulés de la « cité d'or perdue », vieille de plus de trois millénaires, découverte par l'égyptologue Zahi Hawass.

Le 8 avril 2021, les autorités égyptiennes annonçaient avoir découvert *« une cité d'or perdue »* sur la rive ouest de l'ancienne Thèbes, promesse de multiples trésors. Baptisée L'Ascension d'Aton, elle comprendrait des habitations, mais aussi des bâtiments administratifs, des ateliers et des commerces. Le cartouche royal d'Amenhotep III (1386-1353 av. J.-C.), déchiffré sur des sceaux et divers objets, permet de dater les vestiges : ils remontent à 3400 ans. Plusieurs égyptologues, sans minimiser l'importance de ces nouvelles fouilles, se montrent cependant dubitatifs. Selon eux, les murs de brique ondulés de la cité indiquent qu'il s'agirait plutôt de quartiers annexes de la cité-palais d'Amenhotep III, Malqata, où auraient pu résider le personnel et les artisans. En effet, lors de fouilles réalisées en 1935, des archéologues de l'Institut français d'archéologie orientale avaient mis au jour, sur un site proche, des murs de la même forme, rare et caractéristique. Cette découverte laisse espérer des informations décisives sur une période encore mystérieuse, celle de la transition vers la période amarnienne, qui correspond aux premières années de règne du fils d'Amenhotep III, Akhénaton. Le souverain quittera ensuite Thèbes pour s'installer à Amarna, ville dédiée à son nouveau culte du disque solaire.

http://sciav.fr/DécouverteThèbes

ET AUSSI

Le collisionneur LHC annonce la découverte de quatre nouvelles particules : des tétraquarks
https://sciav.fr/DécouverteLHC

Une IA aide des chercheurs à identifier une séquence d'ADN responsable de la transcription d'un quart de nos gènes
http://sciav.fr/DécouverteGènes

On peut déterminer le sexe d'un squelette grâce à la forme de sa cochlée
http://sciav.fr/DécouverteCochlée

Réseaux solidaires en forêt

Lors d'une balade sylvestre, Sebastian Leuzinger, professeur d'écologie à l'Université de technologie d'Auckland (Nouvelle-Zélande), s'étonne de découvrir une souche de conifère encore verte. Cette vision fortuite l'amène à comprendre que les arbres sont solidaires les uns des autres et qu'il existe plusieurs réseaux souterrains pour les relier. Le premier, utilisant la symbiose mycorhizienne, s'effectue par l'intermédiaire des champignons colonisant les racines, dont les filaments captent dans le sol les nutriments qu'ils vont échanger contre les sucres fabriqués par les végétaux au cours de la photosynthèse. Plus tentaculaire, le greffage naturel entre les racines des arbres assure en temps voulu un apport en eau, en sucres et en matière organique aux individus dans le besoin. La souche fournit ainsi à ses voisins l'eau présente dans ses racines, notamment lorsqu'ils sont soumis à une forte évapotranspiration ; en retour, elle est approvisionnée en nutriments. Ces premières analyses ne sont que les prémisses d'une nouvelle compréhension des interactions régissant le super-organisme qu'est en réalité la forêt.

http://sciav.fr/DécouverteForêt

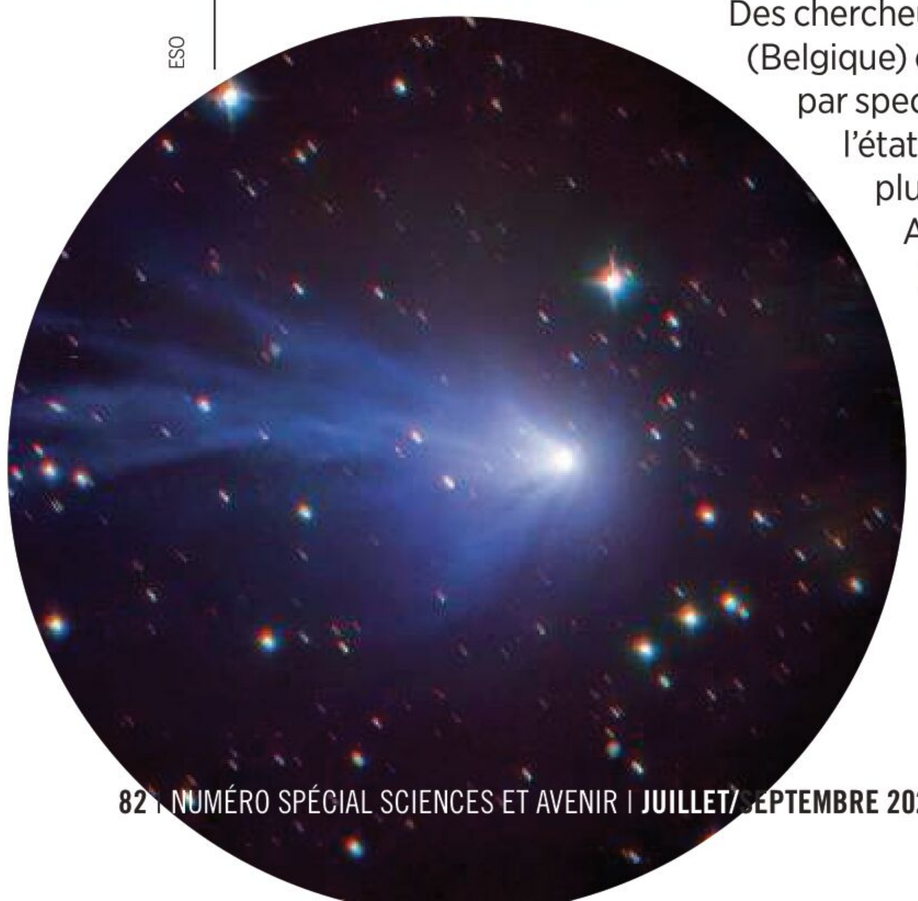
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE D'AUCKLAND/SEBASTIAN LEUZINGER

Les souches entretiennent des liens actifs avec leurs voisins.

Des métaux sublimés dans l'atmosphère des comètes

Des chercheurs de l'université de Liège (Belgique) ont par hasard décelé la présence, par spectrographie, de fer et de nickel à l'état gazeux dans l'atmosphère de plusieurs comètes du Système solaire. Afin de confirmer cette découverte, ils ont dû réexaminer toutes les données enregistrées depuis vingt ans par le Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO). La surprise est de taille : tout d'abord parce que les atomes de ces métaux lourds ne peuvent se sublimer qu'en cas d'extrême chaleur ; ensuite parce qu'ils sont présents en quantités égales, alors que les objets du Système solaire comportent habituellement dix fois plus de fer que de nickel. Pour expliquer cette double inconnue, les scientifiques émettent l'hypothèse de la présence, à la surface de ces astres, de composés organométalliques (aux molécules constituées d'un atome de métal lié à un atome de carbone), dont la température de sublimation est très basse. Les comètes étant des corps quasi inchangés depuis leur formation, cette découverte pourra fournir de précieux indices sur les origines du Système solaire.

https://sciav.fr/DécouverteComètes



ESO

La brillante comète C/2016 R2, dans l'atmosphère de laquelle on a détecté du fer et du nickel.

Concepteur
et fabricant
FRANÇAIS

Douches Kinedo

présente

Kinemagic

Pour éviter les chutes dans la salle de bain,

remplacez votre baignoire par une douche luxueuse et sécurisée.

100% sécurisé

Pose en 48h sans gros travaux

Devis gratuit

VU À LA TV

Fabrication française

PLUS D'INFORMATIONS

par téléphone
0 800 05 06 07 Service & appel gratuits

par internet
www.kinemagic.fr

par courrier
en retournant la demande de devis personnalisé et gratuit
Coupon à envoyer à :
AQUAPRODUCTION
LIBRE RÉPONSE 51045
44680 SAINTE PAZANNE

❑ Oui, je souhaite en savoir plus sur la douche Kinemagic et bénéficier d'un **DEVIS GRATUIT** sans engagement de ma part.

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

CP : ..... Ville : .....

Téléphone : .....

Email : .....

N'affranchissez pas ce courrier, nous vous offrons les frais postaux.

Kinemagic - Paris Match

mgen

GROUPE VYV

POUR SON AUTHENTICITÉ

J'AI CHOISI MGEN

MUTUELLE SANTÉ - PRÉVOYANCE

Perrine Laffont a choisi MGEN pour son engagement à protéger la santé des personnes en toutes circonstances. Authentiquement mutualiste, MGEN rend accessibles les meilleurs soins à tous. Rejoignez-là.

PERRINE LAFFONT

CHAMPIONNE OLYMPIQUE DE SKI DE BOSSES & 4 FOIS VICTORIEUSE DE LA COUPE DU MONDE.

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max Hymans -75748 PARIS CEDEX 15.

www.antigel.agency - 02326 - Juin 2021 - © Hervé Thouroude - Document publicitaire n'ayant pas de valeur contractuelle.